

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades



Diseño, construcción y caracterización de detector de radiación
Vavilov-Cherenkov de agua

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Daniel Eduardo Conde Villatoro para optar al grado académico de Licenciado en Física;
Pablo Roberto Duque Soto para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Electrónica;

Karen Roxana Guarcax Témacaj para optar al grado académico de Licenciada en Química;
Miguel Novella Linares para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en
C.C. de la Computación y Tecnologías de la Información;

Luis José Pinillos Motta para optar al grado académico de Licenciado Ingeniería
Mecatrónica;

Gabriel Andrés Solomon Chajón para optar al grado académico de Licenciado en
Ingeniería Industrial.

Guatemala

2016

Diseño, construcción y caracterización de detector de radiación
Vavilov-Cherenkov de agua

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades



Diseño, Construcción y Caracterización de Detector de Radiación
Vavilov-Cherenkov de Agua

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Daniel Eduardo Conde Villatoro para optar al grado académico de Licenciado en Física;
Pablo Roberto Duque Soto para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Electrónica;

Karen Roxana Guarcax Témacaj para optar al grado académico de Licenciada en Química;
Miguel Novella Linares para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en
C.C. de la Computación y Tecnologías de la Información;

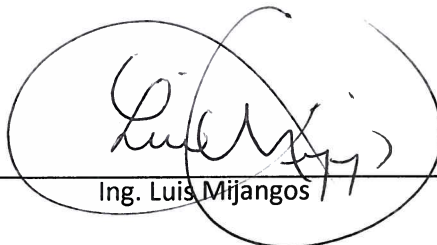
Luis José Pinillos Motta para optar al grado académico de Licenciado Ingeniería
Mecatrónica;

Gabriel Andrés Solomon Chajón para optar al grado académico de Licenciado en
Ingeniería Industrial.

Guatemala

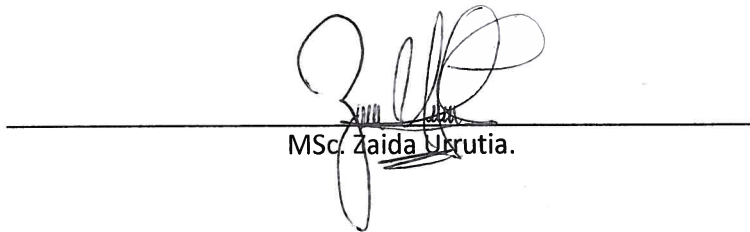
2016

Vo.Bo.:

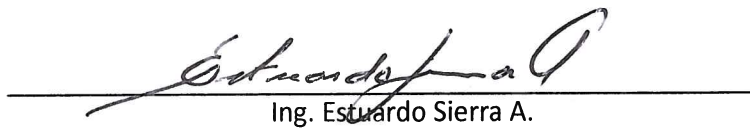


Ing. Luis Mijangos

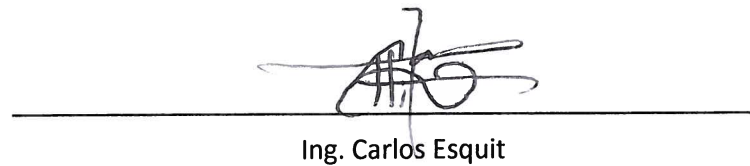
Directores de Departamentos:



MSc. Zaida Urrutia.



Ing. Estuardo Sierra A.



Ing. Carlos Esquit



Ing. Douglas Barrios



Lic. Ángel Ramírez

Fecha de aprobación:

Guatemala, 28 Noviembre 2016

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin el estímulo, organización y conocimiento de nuestro coordinador de proyecto, Luis Mijangos, o sin el apoyo del departamento de física, a través de su directora Zaida Urrutia. Luis y Zaida con orgullo nos desafiaron a seis estudiantes de diferentes carreras a enfrentar el primer megaproyecto del departamento, y con éxito podemos agradecerles nuestra entrada al mundo profesional.

Agradecemos profundamente a miembros de la Universidad de San Carlos de Guatemala que desde inicios 2014 nos han inducido a participar en la colaboración de LAGO (Latin American Giant Observatory) a través de talleres, conferencias y con su alta disponibilidad para compartir trabajo. Entre ellos Rodrigo Ardón, Edgar Cifuentes Héctor Pérez, Luis Guillermo García y compañeros estudiantes de USAC con quienes esperamos seguir colaborando en futuras aspiraciones.

También queremos agradecer a nuestros asesores de trabajo de graduación, quienes apoyaron a fortalecer este proyecto de manera multidisciplinaria: Héctor Pérez (asesor de Daniel Conde), Pablo Mazariegos (asesor de Pablo Duque y Luis Pinillos), Angelika Hasselman (asesora de Karen Guarcax), Herberth Campos (asesor de Gabriel Solomon).

Adicionalmente, a todos los miembros de la Universidad del Valle de Guatemala quienes nos ayudaron durante cualquier etapa del proyecto, entre ellos Olga Castellanos (secretaria del departamento de física) y Byron Alay (encargado del laboratorio de física).

Por supuesto, también agradecemos a la colaboración LAGO y a todos los miembros que trascendentemente nos ofrecieron tiempo, conocimiento e incluso materiales y equipo importante para el proyecto. Resaltamos la facilidad de acceso a información que nos ofreció la comunidad, tanto a través de participación en reuniones en línea de los diferentes grupos de trabajo, como la wiki del proyecto. Nos sentimos honrados de

aprender y colaborar con un proyecto internacional latinoamericano de tal calibre investigativo.

Debemos un agradecimiento especial a Horacio Arnaldi, investigador del Instituto de Bariloche y miembro de la colaboración, a quien damos crédito de darnos el empujón inicial y contundente para avanzar con el proyecto luego de su visita a la Universidad del Valle y a la Universidad San Carlos. La semana que compartió con nosotros fue de alto enriquecimiento para el proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE CUADROS.....	xxi
RESUMEN	xxv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	5
A. Objetivo general del megaproyecto	5
B. Objetivo general por módulo	5
C. Objetivos específicos	6
III. JUSTIFICACIÓN.....	8
IV. RAYOS CÓSMICOS	11
A. Generalidades y descubrimiento de los rayos cósmicos	11
B. Orígenes de los rayos cósmicos de ultra alta energía	12
C. Modulación solar de rayos cósmicos	13
D. Cascadas de área extensa de rayos cósmicos.....	14
E. Efectos del clima espacial y radiación cósmica sobre la tierra	18
V. DETECTORES DE SUPERFICIE.....	22
A. Detectores en sondas y globos	22
B. Detectores de superficie.....	22
C. Radiación Vavilov-Cherenkov.....	23
D. Latin American Giant Observatory.....	34
E. Identificación de partículas en detectores de Vavilov-Cherenkov terrestres.....	56
F. Simulación Geant4 de detectores Cherenkov en agua	59
G. Caracterización del medio en detectores de radiación Vavilov-Cherenkov de agua.....	61

VI. FUNDAMENTOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y APRENDIZAJE DE MÁQUINA	81
A. Aprendizaje supervisado	81
B. Aprendizaje no supervisado	82
VII. PMI Y LAS BUENAS PRÁCTICAS DE GESTIÓN DE PROYECTOS.....	87
VIII. CALIDAD DE AGUA	120
A. Sólidos en el agua	120
B. Conductividad eléctrica	120
C. Resistividad.....	121
D. Absorbancia	121
E. Turbidez	123
F. pH.....	123
G. Tratamiento de agua.....	123
IX. PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	126
A. Índice de refracción.....	126
B. Reflexión con incidencia oblicua.....	128
C. Criterio de Rugosidad de Rayleigh	131
X. CONSTRUCCIÓN DEL DETECTOR Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....	133
A. Metodología original.....	133
B. Metodología final.....	136
XI. MÓDULO DE CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO.....	159
A. Metodología	159
B. Resultados y discusión	178
XII. MÓDULO DE EXPERIMENTOS EN SIMULACIÓN	234
A. Metodología	234

B.	Resultados y discusión	240
XIII.	MÓDULO DE CALIBRACIÓN, ANÁLISIS Y CLASIFICACIÓN	249
A.	Análisis de eventos cósmicos.....	249
B.	Calibración de eventos cósmicos.....	252
C.	Resultados.....	255
D.	Clasificación de eventos cósmicos.....	263
E.	Discusión del módulo	268
XIV.	MÓDULO DE GESTIÓN DEL PROYECTO	276
A.	Iniciación.....	278
B.	Planificación	282
C.	Ejecución.....	323
D.	Control y monitoreo.....	325
XV.	MÓDULO DE ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL PMT	330
A.	Adquisición con Red Pitaya:.....	330
B.	Caracterización del fotomultiplicador.....	336
XVI.	CONCLUSIONES	339
A.	Módulo de caracterización del medio.....	339
B.	Módulo de experimentos en simulación	340
C.	Módulo de análisis, calibración y caracterización	341
D.	Módulo de gestión del proyecto.....	341
E.	Módulo de adquisición y caracterización del PMT	342
XVII.	RECOMENDACIONES	343
A.	Módulo de caracterización del medio.....	343
B.	Módulo de gestión del proyecto.....	344
C.	Módulo de adquisición y caracterización del PMT	344

XVIII.	BIBLIOGRAFÍA.....	346
XIX.	ANEXOS.....	357
A.	Más detalle de la geometría en la simulación	357
B.	Normalidad de fotones producidos y detectados en la simulación	359
C.	Gráficas de los 2000 pulsos analizados para la caracterización de la simulación	361
D.	Análisis de resultados: módulo de caracterización del medio	362
E.	Apoyo del uso de Red Pitaya	368
F.	Red de actividades: módulo de gestión del proyecto	373

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Conteo en el detector Nahuelito durante un decrecimiento Forbush entre enero y febrero, graficado junto al conteo por el monitor de neutrones Rome	13
Figura 2. Cascadas de área extensa producidas por un fotón (izquierda), un protón (centro) y un átomo de hierro (derecha). Los colores indican las tres cascadas principales: la parte electromagnética (rojo), muónica (verde) y hadrónica (azul)	15
Figura 3. Distribución de la energía de muones generada con números aleatorios basado en la fórmula de Geisser	17
Figura 4. Datos de número de fallos promedio en el sistema de fuentes de alimentación en Azerbaiyán: la línea punteada corresponde a datos obtenidos de promedios, en ocho fechas de pequeña periodicidad llamadas modos, línea continua corresponde a promedio de cada mes designado.....	19
Figura 5. Ejemplo de cartograma de amplitud del electroencefalograma durante una tormenta geomagnética severa, en una medición realizada en una persona en un proceso de hiperventilación.....	20
Figura 6. a) Paso de una partícula cargada en un medio transparente con velocidades bajas. b) paso de una partícula cargada en un material transparente con velocidad mayor a la velocidad de la luz en ese material.....	25
Figura 7. Geometría relevante en la radiación Cherenkov	28
Figura 8. Conos de emisión de radiación Vavilov-Cherenkov en medios isotrópicos.	30
Figura 9. Número de fotones producidos por unidad de longitud de trayectoria para varios materiales en función de la velocidad de partícula.	32
Figura 10. Compilación de radiadores Vavilov-Cherenkov. El índice de refracción de los gases está dado por 0°C a 1 atm (STP). El sodio sólido es transparente a longitudes de onda de 200nm.....	33
Figura 11. Distribución geográfica de los detectores de LAGO operacionales (triángulos), y los que comenzarán a funcionar entre 2016 y 2017 (cuadrados).....	34
Figura 12. Diagrama de un detector típico de la colaboración LAGO	35
Figura 13. Construcción básica de un PMT	37
Figura 14. Diagramas de a) la construcción básica de Photonis XP1802 con dimensiones dadas en mm y b) su espectro de radiación.....	38
Figura 15. Ejemplificación de las salidas esperadas cuando el PMT se encuentra aislado de luz externa.	40

Figura 16. Calibración del detector Guane-1 en Colombia. Cada curva representa el barrido en voltajes para un umbral determinado. La región estable del PMT se observa entre 1500 y 1700V.....	41
Figura 17. Diagrama esquemático de un canal de adquisición en la placa digitalizadora LAGO.	46
Figura 18. Placa digitalizadora LAGO. J1 a J3 son los canales de adquisición. J5 a J8 son las salidas para el control del PMT. J8 es el conector Hirose FX2.....	47
Figura 19. Diagrama de bloques de la electrónica LAGO para tres tanques, mostrando el kit de desarrollo Nexys 2 conectada a una fuente externa y la tarjeta digitalizadora.	47
Figura 20. Ejemplo de una base de un PMT de LAGO. En rojo se marca el conector SMA donde salen los pulsos del ánodo del PMT.....	48
Figura 21. Conector db15 plano de una base PMT de LAGO. Los pines están enumerados dependiendo de la conexión específica que requiere la placa.....	48
Figura 22. Vista de planta de la tarjeta Nexys 2.	50
Figura 23: Formato de un pulso en el archivo crudo producido con el sistema de adquisición ACQUA.....	51
Figura 24. Señalización del hardware básico con el que cuenta una Red Pitaya.....	53
Figura 25. Señalización de las entradas analógicas de alta velocidad con las que cuenta una Red Pitaya.	54
Figura 26. Señalización de pines con los que cuenta Red Pitaya.	55
Figura 27. Diagrama esquemático del WCD y del sistema de adquisición usado en el trabajo de Salazar y Villaseñor (2005) mostrando el uso de hodoscopio para la identificación de muones verticales.....	56
Figura 28. Amplitud respecto al tiempo de subida 10 a 90% para la clasificación de muones arbitrarios.....	57
Figura 29. Histograma de carga integrada en ADCq (en el eje horizontal) típico para un WCD, tomado con datos de Nahuelito	58
Figura 30: Posibles reflexiones que el modelo UNIFIED calcula para la dirección de reflexión de fotones ópticos incidentes a superficies ásperas. Las sombras ilustran la probabilidad gaussiana de cada reflexión	61
Figura 31. Esquema de purificación y recirculación de agua para el detector de LHAASO.	62
Figura 32. Sistema de control de largo de atenuación de la luz correlacionada con la profundidad de agua en el detector de LHAASO.	63

Figura 33. Arriba) representa la relación logarítmica de la amplitud de la señal del PMT y el nivel de agua. Abajo) es la relación del largo de atenuación del agua y el periodo de medición.....	64
Figura 34. Sistema de circulación y purificación del WCD del Instituto de Altas Energías de Física de Beijing, China.	66
Figura 35. Disminución de curva de resistividad del agua respecto el tiempo, después de apagar el sistema de purificación del WCD del Instituto de Altas Energías de Física de Beijing, China.	67
Figura 36. Porcentaje de absorbancia de las diferentes muestras de agua del páramo de Berlín y agua decantada sin ningún tratamiento de 400-500 nm.....	69
Figura 37. Izquierda) Fotografía de muestra de Bucaramanga con seis meses sin tratamiento, tamaño de microorganismos de 6.94 μ m. Derecha) Fotografía de muestra de agua de Bucaramanga con seis meses con tratamiento desinfectante, tamaño de microorganismos de 0.25 μ m.....	70
Figura 38. Tanque del detector de Radiación Vavilov-Cherenkov en la Universidad de San Carlos de Guatemala.	72
Figura 39. Arreglo experimental para la medición de Intensidad luminosa reflejada por Tyvek. A: tubo de sílice lleno de agua; OFM: es la fibra óptica del monocromador; OFP: fibra óptica hacia el tubo fotomultiplicador; B y C: adaptadores de fibras ópticas; S: muestra bajo estudio (Tyvek); N: normal hacia la superficie; D: rendija; I y E: haz de luz entrante y saliente, respectivamente; θ_i y θ_r : ángulo de incidencia y ángulo de reflexión.	73
Figura 40. Amplitud de distribución continua y alto de pico vrs longitud de onda de incidencia a 75°.....	75
Figura 41. Ajuste de los datos experimentales de intensidad detectada por fotomultiplicador y ángulo de dispersado utilizando Ecuación 25 para muestra de Tyvek en agua, a 300, 400,560 y 640nm nm.	76
Figura 42. Resultados de filtración de agua en tanque detector de Femilab.....	78
Figura 43. Distribución de carga de señal del PMT ETL 9354 producida por muones atravesando la ventana de entrada del PMT. Izquierda) detección vertical. Derecha) detección horizontal.	80
Figura 44. Visualización de las interacciones de los distintos grupos de procesos de la Gestión de Proyectos.....	92

Figura 45. Integración de los distintos planes de gestión hacia el plan de dirección del proyecto.....	94
Figura 46. Cambio del índice de refracción respecto a la longitud de onda electromagnética para un vidrio.....	127
Figura 47. Plano de incidencia. En donde los números de onda y ángulos $k_I, \theta_I; k_R, \theta_R; k_T, \theta_T$ corresponden a las onda incidente, reflejada y transmitida respectivamente.	129
Figura 48. Orientación de los vectores normales de superficie para una muestra con a) reflexión difusa y b) reflexión especular	131
Figura 49. Criterio de Rayleigh. La radiación es reflejada especularmente a un ángulo θ_0 desde la superficie de la cual la raíz cuadrada de la desviación de la altura es Δh . La diferencia de largo de los dos rayos es $2\Delta h \cos\theta_0$	132
Figura 50. Visita de Horacio Arnaldi a la UVG. De izquierda a derecha: Karen Guarcax, Luis Mijangos, Luis José Pinillos, Horacio Arnaldi (LAGO Bariloche), Miguel Novella, Daniel Conde y Pablo Duque.....	136
Figura 51. Tanque de polietileno, de 600L marca Talishte utilizado como base del detector.....	137
Figura 52. El detector K'inich Ahau, mostrando el tanque y el sistema de digitalización	139
Figura 53. Módulo de presión y temperatura y módulo GPS utilizados.....	146
Figura 54. Interfaz del módulo GPS funcionando	147
Figura 55. Vista superior de una Red Pitaya.....	148
Figura 56. Error que muestra la terminal de comandos de Linux al no poder instalar la librería lib32bz2-1.0.....	150
Figura 57. Imagen de la terminal una vez se haya accedido a Red Pitaya.	155
Figura 58. Cajas plásticas utilizadas para Prueba de jarras.	170
Figura 59. Medición de absorbancia de Prueba de jarras utilizando Spectrometer Pasco modelo PS-2600.....	170
Figura 60. Izquierda) Multisensor PASCO con sus respectivas conexiones de análisis de temperatura y conductividad. Derecha) Medición de conductividad de Prueba de Jarras.	171
Figura 61. Sistema utilizado para la medición de reflectividad de Tyvek. A) vista superior del sistema utilizado. B) Universal Interface 850 marca Pasco. C) vista superior de Basic Optics Diode Laser en Riel # 2. D) vista superior de Ray Table y Rotary Motion Sensor,	

encirculada en rojo se encuentra la cubeta, del espectrofotómetro, utilizada para las mediciones.	173
Figura 62. Cubeta de espectrofotómetro utilizada para las mediciones. Izquierda) Cubeta con vinilo de fibra de carbono DI-NOC marca 3M. Derecha) Cubeta con vinilo de fibra de carbono DI-NOC marca 3M y Tyvek marca Dupont ®.....	174
Figura 63. Izquierda) calibración de potenciómetro. Derecha) Medición de pH, conductividad y temperatura simultáneamente.....	175
Figura 64. Medias marginales estimadas de conductividad para las tres jarras y las mediciones realizadas semanalmente.	183
Figura 65. Absorbancia de las cuatro semanas de medición de la Jarra 1 (control), en un rango espectral de 379.94 - 950.206 ±0.001nm.....	187
Figura 66. Absorbancia de las cuatro semanas de medición de la Jarra 2 (107.19 ±0.44ppm de ácido tricloroisocianúrico) en un rango espectral de 379.94 - 950.206 ±0.001nm.	188
Figura 67. Absorbancia de las cuatro semanas de medición de la Jarra 3 (0.99 ±4.46*10 ⁻³ mL/L de peróxido de hidrógeno) en un rango espectral de 379.94 - 950.206 ±0.001nm.	188
Figura 68. Medias marginales estimadas de absorbancias para las tres jarras y las longitudes de onda.	189
Figura 69. Medias marginales estimadas de absorbancias para las cuatro semanas de medición y las longitudes de onda.	192
Figura 70. Medias marginales estimadas de absorbancias para las cuatro semanas de medición y las tres jarras.....	195
Figura 71. Arriba) Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek en el aire. Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek en el aire. Longitud de onda de medición de 650nm.....	197
Figura 72. Arriba) Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua de Jarra 1. Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua de Jarra 1. Longitud de onda de medición de 650nm. .	199
Figura 73. Arriba) Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua de Jarra 2. Abajo) Ajuste de curva	

gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua de Jarra 2. Longitud de onda de medición de 650nm. .	200
Figura 74. Arriba) Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua de Jarra 3. Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua de Jarra 3. Longitud de onda de medición de 650nm. .	201
Figura 75. Arriba) Ajuste de curvas gaussianas a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia del plástico frontal de la cubeta de Spectrometer Pasco. Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia del plástico frontal de la cubeta de Spectrometer Pasco. Longitud de onda de medición de 650nm.....	203
Figura 76. Arriba) Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en espejo. Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el espejo. Longitud de onda de medición de 650nm.....	204
Figura 77. Valores promedios y desviación estándar de las mediciones de conductividad y temperatura realizadas al agua ultra pura, agua municipal, agua decantada con alumbre y agua decantada con alumbre (10.422 ± 0.01 ppm) y peróxido de hidrógeno (600 ± 5 mL).	215
Figura 78. Valores promedios y desviación estándar de las mediciones de turbidez y pH (temperatura de medición Figura 40) realizadas al agua ultra pura, agua municipal, agua decantada con alumbre y agua decantada con alumbre (10.422 ± 0.01 ppm) y peróxido de hidrógeno (600 ± 5 mL).	216
Figura 79. Absorbancia de agua ultra pura, agua en el tanque de detección tratada con alumbre (10.422 ± 0.01 ppm), agua en el tanque de detección tratada con alumbre (10.422 ± 0.01 ppm) y peróxido de hidrógeno (600 ± 5 mL) y agua municipal antes de tratar. Las mediciones fueron realizadas en un rango espectral de $379.940 - 950.206 \pm 0.001$ nm. La línea negra y el punto señalado corresponden a la longitud de onda del mínimo de las absorbancias de las mediciones realizadas.	218
Figura 80. Arriba) Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada respecto al ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua ultra pura. Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua ultra pura. Longitud de onda de medición de 650nm. .	220

Figura 81. Arriba) Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua del tanque del detector, tratada con Alumbre y H ₂ O ₂ . Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua del tanque del detector, tratada con Alumbre y H ₂ O ₂	221
Figura 82. Medias marginales estimadas de la Señal (ADC _p) asignadas a Tiempo (bin x 25ns) y la medición realizada.	229
Figura 83. Ilustración de la geometría general del detector en la simulación Geant4, mostrando el recubrimiento Tyvek en forma cilíndrica y las superficies de vidrio y fotocátodo del fotomultiplicador.....	235
Figura 84. Distribución para el ángulo θ generadas por el algoritmo del muestreo por rechazo (histograma) y la curva $\cos^2\theta$	238
Figura 85. El promedio de todos los pulsos para cada tipo de partícula.....	240
Figura 86. Representación gráfica de la relación entre amplitud y tiempo de subida para los diferentes tipos de partículas que generaron los pulsos en la simulación	242
Figura 87. Promedio del número de fotones detectados respecto a la energía del muón vertical incidente. Las barras de error representan el intervalo de un 95% de confianza.	244
Figura 88. Histograma de fotones detectados para el arribo de muones entre 0.5 y 4 GeV	246
Figura 89. Posición de los máximos de los histogramas de fotones detectados en la simulación para diferentes porcentajes de pureza.....	247
Figura 90. Histogramas ADC _q de 4 horas de funcionamiento del detector, con el segundo pico identificado con una regresión cuadrática entre 140 ADC _q y 240 ADC _q y el punto de transición con el mismo método entre 50 ADC _q y 140 ADC _q	248
Figura 91. Prueba del modo scaler de LAGO.....	250
Figura 92. Prueba del modo histograma de LAGO	251
Figura 93. Prueba del modo decaimiento de LAGO.....	252
Figura 94. Conteo de eventos para el 23 de agosto.....	255
Figura 95. Conteo de eventos del 8 de octubre.....	256
Figura 96. Conteo de eventos del 23 de septiembre	256
Figura 97. Histogramas de amplitud y carga del 23 de agosto	257
Figura 98. Histogramas de amplitud y carga del 8 de octubre.....	258
Figura 99. Histogramas de amplitud y carga del 23 de septiembre	258

Figura 100. Histogramas de carga en distintos intervalos del 23 de agosto	259
Figura 101. Conteo de tiempo entre eventos consecutivos del 23 de agosto.....	260
Figura 102. Conteo de tiempo entre eventos consecutivos del 8 de octubre	260
Figura 103. Conteo de tiempo entre eventos consecutivos del 23 de septiembre.....	261
Figura 104. Modo decaimiento en datos de Raspberry Pi	262
Figura 105. Modo histograma en datos de Raspberry Pi	262
Figura 106. Modo scaler en datos de Raspberry Pi	263
Figura 107. Clasificación bayesiana aplicada a eventos cósmicos, mostrando carga integrada ascendente con el color	264
Figura 108. Comparación de la separación de datos simulados, experimentales y de la literatura	265
Figura 109. Resultado de algoritmo KNN para $K=3$	266
Figura 110. Resultado de algoritmo KNN para $K=4$	267
Figura 111. Error en conteo de eventos del 23 de agosto	270
Figura 112. Poder vs interés de interesados.....	282
Figura 113. Diagrama de red para módulo de transferencia, almacenamiento y caracterización de datos	305
Figura 114. Diagrama de red para módulo de Diseño y construcción de tanques.....	306
Figura 115. Diagrama de red para módulo de Análisis de partículas	306
Figura 116. Diagrama de hitos, basado en el cronograma del Proyecto.	312
Figura 117. Línea base de costos para la tercera fase del megaproyecto lago.....	315
Figura 118. Costos por periodo, en quetzales	316
Figura 119. Gráfica mostrando la ecuación que representa la relación entre valores digitales y valor de alto voltaje entregado al PMT utilizando el Canal2.	330
Figura 120. Pulso promedio obtenido en un osciloscopio al polarizar el PMT con 730V.	330
Figura 121. Pulso promedio obtenido en un osciloscopio al polarizar el PMT con 1003V.	331
Figura 122. Pulso saturado obtenido en un osciloscopio al polarizar el PMT con 1345V.	331
Figura 123. Gráfica de los datos de prueba adquiridos por el canal de alta velocidad de Red Pitaya, relacionando voltaje con tiempo.....	332
Figura 124. Medición manual del barrido de voltaje del fototubo. En el eje horizontal se encuentra el voltaje aplicado y el vertical el flujo de eventos en el detector	338

Figura 125. Voltaje óptimo del fotomultiplicador utilizando el algoritmo k-means	338
Figura 126. Histogramas de los fotones producidos, fotones detectados y el cociente de los fotones detectados sobre los producidos para un muón vertical de 4GeV en la simulación, con un tamaño muestral de 1000 eventos.....	359
Figura 127. a) 1000 pulsos sobrepuestos de las detecciones de fotones para muón vertical de 4GeV, b) 500 pulsos sobrepuestos de las detecciones de fotones para partículas gamma de 100 MeV, c) 500 pulsos sobrepuestos de las detecciones de fotones para electrón de Michael de 37 MeV.....	361
Figura 128. Obtenido de (Red Pitaya, 2016). Funciones generales y de manipulación de puertos en C para Red Pitaya.	368
Figura 129. Obtenida de (Red Pitaya, 2016). Funciones en C de adquisición de datos de los puertos de alta frecuencia para Red Pitaya.....	369
Figura 130. Obtenido de (Red Pitaya, 2016). Funciones en C para generación de señales de alta frecuencia para Red Pitaya.	370
Figura 131. Obtenido de (Red Pitaya, 2016). Funciones en C para comunicación i2C para Red Pitaya.	371
Figura 132. Código escrito en C cuya función muestrear una señal a una frecuencia de 125MHz.	371
Figura 133. Diagrama de flujo del programa de adquisición en Red Pitaya al conectarse al PMT	372
Figura 134. Diagrama de red de actividades para la realización del proyecto.	373

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Diferenciación de radiación Vavilov-Cherenkov y luminiscencia	24
Cuadro 2. Tabla de conexión de la base PMT de LAGO.	49
Cuadro 3. Estudio de agua realizado en Cumbayá, Ecuador.	65
Cuadro 4. Resultados obtenidos de las pruebas de jarras realizadas con los diferentes floculantes en las diferentes muestras de agua.	68
Cuadro 5. Resultados obtenidos de conteo de microorganismos patógenos presentes en muestras de agua del páramo de Berlín sin aplicar ningún tratamiento.	69
Cuadro 6. Reactivos y materiales para cada etapa de la metodología del módulo.	159
Cuadro 7. Conceptualización y operacionalización de variables.....	164
Cuadro 8. Definición de proporciones utilizadas en Prueba de jarras.	169
Cuadro 9. Análisis de valores de conductividad asignada a cada semana de medición de las tres diferentes jarras.....	180
Cuadro 10. Prueba de efectos inter-sujetos para evaluar el efecto de toma de datos de conductividad asignada a una semana, jarra o la interacción del efecto de las semanas y jarras.....	183
Cuadro 11. Prueba de Post-Hoc para evaluar el efecto de toma de datos de conductividad asignada a una jarra.....	185
Cuadro 12. Prueba de Post-Hoc para evaluar el efecto de toma de datos de conductividad asignada a una jarra.....	186
Cuadro 13. Prueba de efectos inter-sujetos para evaluar el efecto de toma de datos de absorbancias asignada a cada Jarra, longitud de onda (LonO) o la interacción entre ambas.	190
Cuadro 14. Prueba de efectos inter-sujetos para evaluar el efecto de toma de datos de absorbancias asignada a cada semana, longitud de onda (LonO) o la interacción entre ambas.	191
Cuadro 15. Prueba de efectos inter-sujetos para evaluar el efecto de toma de datos de absorbancias asignada a cada semana, jarra o la interacción entre ambas.....	194
Cuadro 16. Prueba de Post-Hoc para evaluar el efecto de toma de datos de absorbancias asignadas a cada una de las semanas de medición.....	194

Cuadro 17. Ajuste de curvas gaussianas y funciones cosenoidales a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek; en el aire, sumergido en el agua en las diferentes jarras. Longitud de onda de medición de 650nm.	208
Cuadro 18. Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia sobre la cubeta plástica del Spectrometer Pasco. Longitud de onda de medición de 650nm.....	209
Cuadro 19. Intensidad relativa máxima, reflectividad y condiciones experimentales de Tyvek en el aire, sumergido en el agua en las diferentes jarras, agua ultra pura y el agua en el tanque del detector (tratada con alumbre y H ₂ O ₂). Longitud de onda de medición de 650nm.	209
Cuadro 20. Índice de refracción de agua con Tricloro, agua oxigenada, agua ultra pura y agua de tanque (tratada con alumbre y agua oxigenada).	211
Cuadro 21. Ajuste de curvas gaussianas y funciones cosenoidales a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek; sumergido en el agua en el tanque del detector (tratada con alumbre y H ₂ O ₂). Longitud de onda de medición de 650nm.	222
Cuadro 22. Intensidad relativa máxima y reflectividad experimental de Tyvek sumergido en el agua en el tanque del detector (tratada con alumbre y H ₂ O ₂). Longitud de onda de medición de 650nm.....	223
Cuadro 23. Análisis de señal obtenida de las corridas realizadas en el tanque del detector: del PMT sumergido en agua municipal, PMT en el aire dentro del tanque y el PMT sumergido en el agua municipal tratada con sulfato de aluminio tipo B y peróxido de hidrógeno.	224
Cuadro 24. Prueba de efectos inter-sujetos para evaluar el efecto de toma de la Señal (ADCp) asignada a la medición realizada, al Tiempo (bin x 25ns).....	226
Cuadro 25. Prueba de Post-Hoc para evaluar el efecto sobre la señal [ADCp] asignada al tiempo [Bin x 25 ns].	227
Cuadro 26. Prueba de Post-Hoc para evaluar el efecto sobre la señal [ADCp] asignada a la medición realizada.	228
Cuadro 27. Descripción de las propiedades de la superficie Agua-Tyvek asignadas para dos energías de fotón	236
Cuadro 28: Intervalos de confianza para los valores medios de amplitud y tiempo de subida para cada tipo de partícula incidente	241
Cuadro 29: Resultados de la regresión lineal de los valores del promedio de fotones detectados respecto a energía de muón vertical incidente	244

Cuadro 30. Resultados del entrenamiento del clasificador Bayesiano	263
Cuadro 31. Procesos utilizados durante la implementación de la tercera fase del proyecto LAGO UVG.....	276
Cuadro 32. Registro de interesados en el proyecto.....	278
Cuadro 33. Plan para la dirección del proyecto	283
Cuadro 34. Lista de procesos de dirección de proyectos utilizados en cada área de conocimiento, con las herramientas utilizadas.....	284
Cuadro 35. Requerimientos identificados para la tercera fase del Megaproyecto LAGO	289
Cuadro 36. Identificación de actividades del módulo de parametrización de control de calidad del agua.....	298
Cuadro 37. Identificación de actividades del módulo de Transferencia, almacenamiento y caracterización de datos	299
Cuadro 38. Identificación de actividades del módulo de Análisis de partículas	301
Cuadro 39. Identificación de actividades del módulo de Diseño y construcción de tanques	302
Cuadro 40. Identificación de actividades del módulo de Electrónica.....	304
Cuadro 41. Estimación de tiempos para actividades de parametrización de control de calidad del agua.....	307
Cuadro 42. Estimación de tiempos para actividades de transferencia, almacenamiento y caracterización de datos	308
Cuadro 43. Estimación de tiempos para actividades de análisis de partículas	309
Cuadro 44. Estimación de tiempos para actividades de diseño y construcción de tanques	310
Cuadro 45. Estimación de tiempos para actividades de electrónica	311
Cuadro 46. Estimación de costos, de abajo a arriba	312
Cuadro 47. Identificación y descripción de riesgos	319
Cuadro 48. Análisis cualitativo y ponderación de riesgos antes de la aplicación de los planes de respuesta.....	321
Cuadro 49. Planes de respuesta por riesgo.....	321
Cuadro 50. Análisis cualitativo y ponderación de riesgos después de aplicar los planes de respuesta.....	322
Cuadro 51. Análisis cuantitativo de riesgos después de la aplicación de planes de respuesta.....	323

Cuadro 52. Detalle de adquisiciones de materiales para la construcción de detectores .	324
Cuadro 53. Definiciones de tipos de cambio dentro del proyecto	325
Cuadro 54. Junta de control de cambios	326
Cuadro 55. Proceso de control de cambios	327
Cuadro 56. Cambios propuestos y aprobados.	328
Cuadro 57. Datos a utilizar para el control del tiempo	328
Cuadro 58. Datos a utilizar para el control del costo	329
Cuadro 59. Descripción de los objetos en la simulación y sus jerarquías lógicas	357
Cuadro 60. Propiedades de material asignadas al agua en la simulación a través de G4MaterialsPropertiesTable y asignadas a 32 energías de fotón	358
Cuadro 61: Valores p para la prueba Shapiro-Wilk de normalidad de las distribuciones de los fotones producidos, detectados y el cociente	360

RESUMEN

El objetivo del megaproyecto fue diseñar y construir un detector de radiación Cherenkov de agua para tomar y procesar datos, en la identificación de partículas secundarias provenientes de cascadas extensas de rayos cósmicos que inciden en el detector. Se buscó apegarse a los estándares de la comunidad LAGO (Latin American Giant Observatory), encargada de un proyecto de detección de cascadas de rayos cósmicos. Se contó con el apoyo de distintos módulos de las carreras de Licenciatura en Física, Licenciatura en Química, Licenciatura en Ingeniería en C.C. de Computación y TI, Licenciatura en Ingeniería Electrónica, Licenciatura en Ingeniería Industrial y Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica. Se encontró el valor de muon equivalente (VEM) para K'inich Ahau, de (250 ± 20) ADCq, con el que se clasifican los eventos por bandas por el modo histograma. La simulación del detector se realizó con Geant4, y se caracterizaron las señales de pulsos típicos del experimento, obteniendo las amplitudes y tiempos de subida promedio de tres tipos de evento: muones de 4GeV que logran atravesar el tanque, partículas gamma de 100 MeV que producen pares cargados y electrones con energías típicas de la distribución de Michael en el decaimiento de un muón. Esta clasificación por amplitud y tiempo de subida se realizó para eventos en el tanque, y junto a los resultados de la simulación y una referencia se mostró que la velocidad de muestreo de 40 MHz hacía imposible distinguir entre eventos de muones y eventos de electrones en el experimento. La implementación de Red Pitaya en la electrónica mejora la velocidad de muestreo a 125 MHz, por lo que se espera mejor concordancia entre los resultados de la simulación y del experimento para el uso de la nueva electrónica.

I. INTRODUCCIÓN

El presente Megaproyecto tiene como objetivo diseñar y construir un detector de radiación Cherenkov de agua (WCD por sus siglas en inglés) para tomar y procesar datos en la determinación de eventos atmosféricos como consecuencia de reducción Forbush. Al culminar la realización de este proyecto se pretendía promover un intercambio generacional de conocimientos de partículas de altas energías, contribuir el área de investigación de este tipo en Guatemala, colaborar con la recopilación de información por parte de observatorios LAGO, y servir como referencia para la construcción de observatorios similares a mayores altitudes en otras regiones del país y futuros megaproyectos.

Explosiones de supernovas, pulsares, tormentas solares, núcleos activos de galaxias, explosiones de rayos gamma (GRB, por sus siglas en inglés), entre otros, liberan partículas hacia la tierra. Estas partículas son conocidas como Radiación Cósmica que, si presentan una energía de 10^{15} eV, no son desviadas hacia los polos terrestres y penetran la atmósfera terrestre. En su camino hacia la superficie, llegar a sufrir ciertas reacciones y sus productos alcanzan la tierra (a la dispersión de estos productos se le conoce como cascadas de área extensa) (Pérez, 2009). Existen pocas investigaciones sobre el efecto de la radiación de altas energías en la tierra, uno de ellos presentado por Babeyev (2006) expone la correlación de tormentas solares sobre el fuerte cambio en el campo geomagnético de la tierra, que en consecuencia genera problemas eléctricos a escala mundial.

Los rayos cósmicos que logran alcanzar la superficie terrestre pueden ser estudiadas y medidas utilizando detectores especializados. Uno de los detectores comunes, por su bajo costo, son los detectores de Radiación Cherenkov de agua (WCD, por sus siglas en ingles). Estos consisten de un tanque lleno de agua, con fotomultiplicadores (PMT) conectados a sistemas eléctricos y computacionales para detectar y procesar las señales obtenidas por la emisión de la radiación Vavilov-Cherenkov en el tanque (Villaseñor y *et al*, 2011). Su utilidad radica en el conteo de partículas de altas energías, aprovechando los límites de umbral de velocidad y energía de las mismas para la emisión de la radiación. (Cherenkov, 1958). Los detectores de este tipo han sido el fin básico del proyecto

conocido como *Latin America Giant Observatory* (LAGO), que busca generar un observatorio global de radiación cósmica con varios WCD distribuidos en distintas latitudes. Entre los países involucrados en este proyecto se encuentran Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Guatemala, México, Perú, Venezuela, entre otros (LAGO, 2015).

El presente proyecto no buscaba determinar la dirección de incidencia de las partículas secundarias, debido a que no se contó con la tecnología y rapidez necesaria para lograrlo. Tampoco se pretendió detectar rayos gamma, ya que el tanque no es suficientemente alto para que ocurra producción de pares y también porque el flujo disminuye considerablemente entre menor altitud: la Ciudad de Guatemala está a una altitud media de 1500 metros sobre el nivel del mar.

Los distintos módulos del Megaproyecto abarcaron todas las áreas necesarias para lograr la construcción del detector, su caracterización y la captura y análisis de eventos cósmicos: Se determinaron los procesos y actividades a seguir para llevar a cabo el proyecto, considerando costos, tiempos, recursos necesarios, etc., así como los posibles riesgos y formas de mitigarlos mediante; se realizó un estudio detallado del medio dispersivo utilizado por el detector (agua) y el recubrimiento del mismo (Tyvek), analizando distintas cualidades, como reflectividad y absorbancia para determinar los valores más adecuados para una mejor detección de eventos; se implementó un WCD con la electrónica de la comunidad LAGO para la adquisición de eventos de cascadas de áreas extensas, cumpliendo con los requerimientos de hardware y los estándares de la comunidad, además del estudio de la factibilidad de la implementación de una electrónica mejorada (RedPitaya) y se implementó el sistema de adquisición ACQUA de la comunidad LAGO pudiendo realizar capturas de datos de eventos cósmicos, así como la calibración del detector y el análisis y clasificación de las distintas componentes de los rayos cósmicos mediante algoritmos de Machine Learning. Todo ello considerando lo disponible en la literatura de física de partículas así como los resultados de simulaciones de Monte Carlo con la herramienta GEANT4 desarrollada por el CERN, buscando analizar las energías de los eventos hadrónicos y los diversos eventos muónicos posibles

(aquellos que atraviesan el tanque y aquellos que decaen, en un muón y un electrón, dentro del tanque).

Respecto al módulo de química, se propuso un estudio del agua en términos de índice de refracción, absorbancia, conductividad, reflectividad de Tyvek y señal de partículas secundarias (detectada por fotomultiplicador), para la caracterización del medio en el que se trabajará el WCD. Además, se planteó el uso de un agente floculante para tratar el agua a ingresar en el tanque del detector. La medición del índice de refracción fue realizada con un refractómetro Abbe. La variación de absorbancia y la conductividad fueron medidas conforme el tiempo utilizándose un espectrofotómetro y un sensor de conductividad respectivamente, para dos agentes desinfectantes (peróxido de hidrógeno y ácido tricloisocinuro). En el caso de la reflectividad del Tyvek, se utilizó un sensor de luz, un sensor de rotación para la medición del ángulo y un láser como haz de luz. El análisis de la señal detectada en el fotomultiplicador, de la emisión de radiación Vavilov-Chrenkov por el paso de partículas relativistas atravesando el detector, fue comparado en diferentes medios. Se determinó que la conductividad tenía un efecto significativo sobre el tipo de desinfectante utilizado y las semanas de medición. Para las mediciones de absorbancias fueron significativos los efectos de las longitudes de onda y la semana de medición. Los índices de refracción fueron menores para las soluciones que contenían peróxido de hidrógeno. La reflexión del Tyvek fue mayor en el aire que el agua. El agente floculante junto con el peróxido de hidrógeno generaron disminución significativa en la intensidad de la señal detectada por el fotomultiplicador, al igual que la medición en el aire, en comparación de las mediciones realizadas en agua municipal.

El módulo electrónico se encargó de investigar posibles mejoras a la electrónica actual de la colaboración LAGO, y la factibilidad de una implementación con hardware más avanzado que el que se tiene actualmente. Las investigaciones buscaron indagar acerca de la factibilidad de automatización de procesos como la calibración de la alimentación de alto voltaje, ajuste de ganancias y tiempo de respuesta del fotomultiplicador. La nueva tecnología a implementar es la Red Pitaya, una tarjeta que cuenta con una FPGA y un procesador ARM dentro de la misma. Presenta una resolución

de digitalización de 14 bits y una frecuencia de 125 MHz. Se adicionó un sensor de presión y temperatura así como un localizador GPS.

Una vez construido y funcionando el WCD se procedió a realizar el análisis y clasificación de los eventos capturados, correspondiente al módulo de Computación y Análisis. Ello se realizó mediante el uso de algoritmos de Inteligencia Artificial y Aprendizaje de Máquina (Machine Learning). Luego de una revisión de la literatura se decidió utilizar los algoritmos *k-means* y *EM-GMM* para la Clasificación No Supervisada y el algoritmo *Naïve Bayes* para la Clasificación Supervisada. Se logró identificar las componentes muónicas y hadrónicas de los rayos cósmicos, encontrando su amplitud y tiempo de subida promedio. Además se realizaron procedimientos especificados por la Guía oficial de LAGO para asegurar la correcta implementación y como fundamento para el análisis y clasificación de los datos.

Durante todo el proyecto fue necesario llevar el control y gestión de los procesos, actividades y entregables del megaproyecto, razón por la cual se contó con el módulo de gestión. Se encontró en la literatura pocas referencias a las prácticas y procedimientos recomendados para un proyecto de carácter científico como el presente, por lo que se decidió implementar las buenas prácticas de gestión de proyectos especificadas por el Project Management Institute (PMI) en su guía PMBOK. Se consideraron varios aspectos del proyecto, siendo de los más importantes los posibles riesgos que existían contra el mismo. Se logró reducir la probabilidad de ocurrencia de todos los riesgos considerados mediante la implementación de planes de respuesta con base en las prioridades del proyecto. Además, se encontró que la guía del PMBOK fue una buena guía para la gestión e implementación del Megaproyecto LAGO-UVG.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general del megaproyecto

Diseñar y construir un detector de radiación Cherenkov de agua para tomar y procesar datos, en la identificación de partículas secundarias provenientes de cascadas extensas de rayos cósmicos que inciden en el detector.

B. Objetivo general por módulo

Física:

- Caracterizar las señales obtenidas del detector utilizando el modo histograma y con una simulación Monte Carlo utilizando Geant4.

Química:

- Estudiar el agua en términos de índice de refracción, absorbancia, conductividad, reflectividad de Tyvek y señal de partículas secundarias (detectada por fotomultiplicador), para la caracterización del medio en el que se trabajará el Detector de Radiación Vavilov-Cherenkov de agua.

Gestión:

- Administrar la implementación del Proyecto LAGO en el Campus Central de la Universidad del Valle de Guatemala.
- Documentar los procesos para la construcción de detectores de partículas cósmicas.

Electrónica:

- Investigar y diseñar posibles mejoras a la electrónica de la colaboración LAGO, buscando mejorar la calidad de los datos y eficiencia en procesos de calibración.

Análisis de Datos:

- Clasificar e Interpretar Eventos Cósmicos de señales provenientes de un Detector Cherenkov de Agua.

C. Objetivos específicos

- Obtener la calibración por el muón vertical equivalente (VEM) del análisis de primer nivel de los datos de ACQUA del montaje experimental en el tanque.
- Calcular la vida media del muón a partir de una corrida del experimento en el WCD.
- Obtener la forma representativa de pulsos en el tiempo con la simulación en Geant4 para muones que atraviesan, muones que decaen, electrones, sus antipartículas respectivas, y partículas gamma.
- Utilizar Algoritmos de Inteligencia Artificial y Aprendizaje de Máquina para el Reconocimiento de Eventos Cósmicos.
- Calibrar el Detector implementado con base en los datos detectados, datos de la comunidad LAGO y la literatura correspondiente.
- Realizar algoritmos efectivos y eficientes que ejecuten las funciones del proyecto, especialmente en su rapidez e integridad de los datos.
- Enviar de datos de una Raspberry Pi a una Computadora local, permitiendo desplegar detectores en lugares remotos.
- Utilizar la Red Pitaya para adquisición de datos como alternativa de vanguardia
- Para la optimización de costos se utilizará agua municipal con sulfato de aluminio granulado Tipo B, requerido para la coagulación de material coloidal disuelto en el agua, por lo que se busca definir la proporción óptima de coagulante a utilizar para el agua que será utilizada en el tanque del detector.
- Estudiar la variación de la señal detectada de Radiación Vavilov-Chrenkov por el fotomultiplicador sumergido en el agua del tanque del detector y fuera de este.
- Medir el cambio de la reflectividad del Tyvek e índice de refracción a una longitud de onda específica, en el rango de emisión de la Radiación Vavilov-

Cherenkov, en agua municipal, agua municipal con peróxido de hidrógeno y agua municipal con ácido tricloroisocianúrico.

- Estudiar la existencia de variabilidad respecto del tiempo de conductividad y absorbancia a longitudes de onda de emisión de radiación Vavilov-Cherenkov para agua municipal, agua municipal con peróxido de hidrógeno y agua municipal con ácido tricloroisocianúrico.
- Gestionar las actividades del proyecto de acuerdo a los procesos establecidos por el Project Management Institute (PMI).
- Planificar y ejecutar el proyecto con el objetivo de finalizarlo en tiempo, cumplir con el presupuesto acordado y cumplir con los requerimientos del proyecto.
- Estructurar el presupuesto de la construcción del detector y las compras del proyecto.
- Identificar y ponderar los riesgos, para luego asignarles un plan de respuesta.
- Investigar la posibilidad de implementar la Red Pitaya en el proceso de adquisición de datos y proveerle, por medio de un PCB secundario, todas las herramientas de control externo y alimentación del tubo fotomultiplicador necesarias.
- Realizar un estudio sobre la factibilidad de un sistema que ofrezca procesos automáticos en el detector, con el fin de reducir la interacción humana en la obtención de datos. Por ejemplo, un sistema de control para la calibración de ganancia del fotomultiplicador.

III. JUSTIFICACIÓN

La comunidad LAGO es un grupo latinoamericano que busca detectar y analizar astropartículas de alta energía, con el fin estudiar la climatología espacial, meteorología y otros temas relacionados. LAGO está conformada por varios WCD ubicados al nivel del suelo en distintos sitios de América Latina, cubriendo una amplia distribución latitudinal (lo que permite detectar cascadas de amplio alcance). Guatemala forma parte de la comunidad LAGO, pero no está transmitiendo datos actualmente. De esta problemática surge la motivación inicial del presente megaproyecto, el cual busca resolverla al implementar un WCD en la Universidad del Valle de Guatemala y adherir a dicha universidad a la comunidad.

Existen antecedentes de investigaciones y trabajos realizados en la UVG de importancia para el proyecto LAGO-UVG. Entre ellos se incluyen los trabajos del Ing. Víctor Araujo (respecto el uso de DSpace como repositorio de almacenamiento de eventos cósmicos de la comunidad LAGO) y el del Ing. Gustavo Castro (relacionado al uso de CORSIKA para simulación de cascadas de eventos cósmicos). Estos proyectos brindan algunos fundamentos necesarios para la implementación de un WCD conectado a la comunidad LAGO, por lo que es de importancia darles seguimiento y aplicar ese conocimiento en el presente proyecto.

Actualmente la comunidad LAGO está buscando mejorar y actualizar las herramientas y tecnología que utilizan en sus detectores. El equipo LAGO-UVG buscaba aprovechar esa oportunidad para innovar y mejorar aspectos como el hardware y programas utilizados. A pesar que el objetivo principal del proyecto era implementar un WCD utilizando la tecnología actual de la comunidad (una Nexys con una placa adquisidora) se realizó una versión adicional del Detector con una tecnología innovadora denominada RedPitaya. Dicha herramienta está especialmente diseñada para proyectos relacionados con detectores de radiación e investigaciones de física de partículas. La RedPitaya tiene varias ventajas sobre sus alternativas, ya que es un sistema todo-en-uno, pudiendo realizando las funciones equivalentes de una Nexys (procesamiento de los eventos y digitalización), una placa Receptora (para capturar los eventos análogos y

transmitirlos a la Nexys) y una Raspberry Pi o computadora (la cual cuenta con un sistema operativo desde el cual se puede almacenar y analizar los datos digitalizados y también obtener parámetros importantes como la ubicación GPS, presión, temperatura, hora, etc.). No obstante, al ser una tecnología bastante reciente se deberá aprender a manejar y adaptarlo a las necesidades de la comunidad LAGO. Como equipo LAGO-UVG se buscó realizar una comparación entre estas dos versiones de detectores, para así poder saber los beneficios de cada una.

El agua utilizada en los detectores es de suma importancia, ya que sus propiedades lumínicas y de refracción afectan considerablemente la forma e intensidad de los eventos detectados. Además, es un medio dieléctrico dispersivo (radiador) que bajo ciertas condiciones emite radiación de Vavilov-Cherenkov (que es capturada por el detector generando los eventos). El análisis del agua utilizada por la comunidad LAGO es un aspecto poco estudiado, a pesar de afectar los datos detectados y la calibración de los detectores. Es por ello que incluimos un estudio detallado del efecto del agua y sus propiedades, en la detección de eventos cósmicos.

Otro aspecto importante es que el detector permitirá a la UVG tener acceso a datos de primera mano de eventos cósmicos, pudiendo utilizarlos para motivos académicos en cursos avanzados de Física (como prácticas de Laboratorio, proyectos, etc.) y como caso de estudio para cursos pertinentes a cada una de las carreras de los integrantes (desde análisis químico del agua, aspectos teóricos de física de partículas, procesamiento y simulación de señales, análisis de algoritmos y clasificación de datos, etc.). Además, los datos disponibles pueden servir para la realización de variedad de artículos científicos, actividad que la universidad debería realizar con mayor frecuencia tanto por los beneficios derivados del conocimiento generado (con una gran aplicación en el estudio de actividad solar y su efecto en la atmósfera) así como para un mejor perfil académico en general. Cabe mencionar que, en evaluaciones recientes, la cantidad de artículos publicados por la Universidad del Valle de Guatemala fue el rubro que obtuvo la menor puntuación, representando un aspecto en el que se podría mejorar.

El detector construido en este megaproyecto es capaz de realizar mediciones indirectas de la modulación de heliósfera de los rayos cósmicos. Por lo tanto, es una

herramienta viable para el monitoreo de la actividad solar. Debido a que la actividad solar y eventos en el medio interplanetario tienen efectos disruptivos sobre la magnetósfera, el estudio del efecto de fenómenos solares desde diferentes posiciones en la Tierra es muy valioso para prevenir daños sobre satélites y problemas en transmisiones de radio. Esto es cada vez más importante debido a la progresiva sofisticación de los aparatos electrónicos.

Por otro lado, este es uno de los pocos proyectos de física experimental en Guatemala, por lo que su valor formativo en el trabajo científico en la comunidad es importante ya que establece una plataforma para continuar la investigación de partículas de altas energías de origen astrofísico. El intercambio generacional que originará el proyecto, así como su mantenimiento y replicación serán formativos para estudiantes de física, química e ingenierías. Además, el trabajo en la electrónica de instrumentación del proyecto será un gran avance en el desarrollo tecnológico del país.

Al culminarse la realización del proyecto se pretende iniciar un laboratorio de física experimental de partículas de altas energías que permita la combinación de conocimientos de diferentes disciplinas científicas, mediante la recopilación de información y mantenimiento del detector. Con esto cumple con el fin de la Universidad de impulsar la docencia y la investigación en los campos de las Ciencias y las Humanidades. Al ser un tema innovador, coadyuva en la aplicación de la ciencia y tecnología modernas al desarrollo del país y de la región centroamericana.

IV. RAYOS CÓSMICOS

A. Generalidades y descubrimiento de los rayos cósmicos

Los rayos cósmicos (RC) son partículas, excluyendo los fotones, que se originan fuera del Sistema Solar y llegan a la Tierra o su entorno cercano. Generalmente estas partículas son núcleos atómicos, desde hidrógeno hasta de hierro. Se les denomina también *primarios*, especialmente en el contexto de cascadas de área extensa (descritas en la sección 4.5). Los rayos cósmicos fueron descubiertos porque en laboratorios de física se observaba que electrómetros cargados y aislados de fuentes radioactivas se descargaban sin aparente razón, y la mejor explicación que se encontró para este fenómeno era el flujo extraterrestre de partículas de altas energías. (Asorey, 2012)

Theodor Wulf desarrolló a los inicios del siglo XX un electroscopio más sensible que los de su época y notó que en la punta de la Torre Eiffel la tasa de decaimiento era mayor de la esperada tomando en cuenta únicamente la radiación gamma, que era la única fuente relevante considerada para esa situación. Por otro lado, Domenico Pacini, realizó tres mediciones: a nivel del suelo, en la superficie del Lago Bracciano, y a tres metros de profundidad en el lago. Comparando estas mediciones, en las que se destacaba que bajo el agua la tasa disminuía, concluyó que debe de haber una fuente de radiación adicional.

V.F. Hess en 1912 fue quien finalmente dijo que la fuente de esta radiación es de origen extraterrestre y que ingresa desde arriba de la atmósfera con gran poder penetrante. El experimento que realizó le ganó el Nobel de Física en 1936. Consistía en la medición de tasas de ionización a diferentes altitudes. Las mediciones las realizó durante 10 vuelos en globos aerostáticos hasta los 5000 m.s.n.m¹. La dependencia de la tasa de ionización sobre la altitud fue lo que llevó a su importante conclusión. (Asorey, 2012)

Los rayos cósmicos tienen un rango de energía extremadamente amplio: desde 10^5 eV, que incluye partículas del viento solar hasta 10^{20} eV, partículas intergalácticas. Los rayos cósmicos de ultra alta energía son primarios con energías superiores a 10^{18} eV. Su medición directa es casi imposible debido al bajísimo flujo. En cambio, se infiere su

¹ Metros sobre el nivel del mar

existencia por la detección de las partículas secundarias producidas por la cascada de área extensa generada por el ingreso del primario. Esto fue observado por primera vez en 1934 por Bruno Rossi quien notó que equipos separados por gran distancia detectaban simultáneamente aumentos en el conteo de partículas; Pierre Auger infirió en 1938 que esto era explicado por el ingreso de una partícula primaria de energías superiores a los 10^{15} eV. (Asorey, 2012)

B. Orígenes de los rayos cósmicos de ultra alta energía

La explicación de rayos cósmicos de ultra alta energía es todavía un problema abierto. Los modelos de aceleración proponen que estas partículas pueden alcanzar energías tan altas por el efecto de aceleradores naturales en el universo. Un ejemplo de mecanismo de aceleración es el ocurrido cuando rayos cósmicos atraviesan una nube de gas en el medio interplanetario. El efecto de esta interacción es un aumento en la energía del RC. Sin embargo, este aumento es ineficiente a menos que la velocidad propia de la nube sea de magnitudes relativistas ($\beta \approx 1$). Un ejemplo de material que cumple con esto son los frentes de choque producidos por supernovas, que sí podrían explicar grandes aceleraciones. Sin embargo, estos modelos sufren aún de sobre-simplificación, ya que consideran la densidad en los frentes de choque como funciones escalón y que el frente es no relativista. (Asorey, 2012)

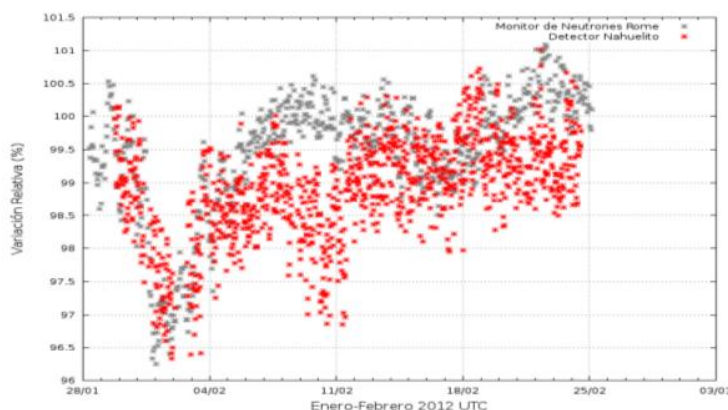
Otra explicación de los rayos cósmicos de ultra alta energía son fuentes con intensos campos magnéticos y grandes dimensiones. Fuentes extragalácticas de rayos cósmicos podrían ser los núcleos galácticos activos, blazares y púlsares. Una limitante a esta idea es el límite de Greisen-Zatsepin-Kuzmin, que es el límite teórico para la energía de rayos cósmicos extragalácticos. El límite lo establece el hecho de que rayos cósmicos que atraviesan grandes distancias interactúan con el fondo cósmico de microondas, perdiendo energía. Los RC provenientes de estas fuentes estarían viajando desde un universo isotrópico por lo que la distribución que los detectores observarían sería isotrópica. En cambio, si las fuentes de aceleración de rayos cósmicos de ultra alta energía están dentro de la galaxia, como en los modelos de aceleración mencionados anteriormente, la distribución de la dirección de los RC apuntaría a estas fuentes. Esto puntualiza la importancia de proyectos de detectores terrestres que sean capaces de determinar la

dirección de arribo de RC, ya que darían más peso a una explicación que la otra. (Pérez, 2009)

C. Modulación solar de rayos cósmicos

La travesía de los rayos cósmicos es afectada por el campo magnético en el espacio. Cuando los rayos cósmicos entran al sistema solar, se encuentran con el campo magnético interplanetario producido por el Sol. Cuando ocurren eventos como eyecciones de masa coronal, el campo magnético interplanetario se intensifica y los rayos cósmicos son desviados. Estos fenómenos consisten en la variación rápida del flujo de rayos cósmicos en la superficie terrestre, seguida por una eyección coronal desde el Sol, llamados decrecimientos Forbush. Este efecto fue descubierto por Scott E. Forbush en 1937, que también observó que la intensidad de los RC, al alcanzar la Tierra, se encontraban inversamente correlacionados con los 11 años de ciclo solar de las manchas solares.

Figura 1. Conteo en el detector Nahuelito durante un decrecimiento Forbush entre enero y febrero, graficado junto al conteo por el monitor de neutrones Rome



Extraído de (Yunior, 2012)

Un detector que lleve la cuenta permanente de los rayos cósmicos que llegan a tierra puede dar información acerca de estos eventos solares que originan los decrecimientos Forbush. A partir de los datos “residuales” de los tanques de agua del arreglo de detectores de RC terrestre en Pierre Auger, se construyó un análisis de modulaciones solares de rayos cósmicos -en los que entran los decrecimientos Forbush- y los

compararon con los mismos análisis para estos eventos estudiados en detectores de neutrones, concluyendo que es un estudio valioso, viable, y complementario en especial a las mediciones por sondas espaciales “in situ” que recolectan esa información en el espacio; el análisis de rayos cósmicos desde el suelo es complementario porque puede dar información de la estructura de la heliósfera y de ICME (*Interplanetary Corona Mass Ejection*), ya que la capacidad de las sondas de hacer esto es mínima. (Villaseñor, 2011)

D. Cascadas de área extensa de rayos cósmicos

Una cascada de área extensa (CAE) es la lluvia de partículas originada por la interacción de un rayo cósmico con un núcleo de elemento constituyente de la atmósfera. Lo que determina la forma de la cascada es la cantidad de materia atravesada, por lo que la densidad (y, por ende, la presión atmosférica) tiene una influencia directa sobre el flujo de partículas en el suelo. Esta correlación inversa entre presión atmosférica y flujo debe de ser corregida si se quiere obtener información sobre el flujo de partículas. En el estudio de las CAE, se define la profundidad atmosférica $X(l)$ como la masa de aire por unidad de área que atraviesa la partícula desde el infinito hasta la posición l ,

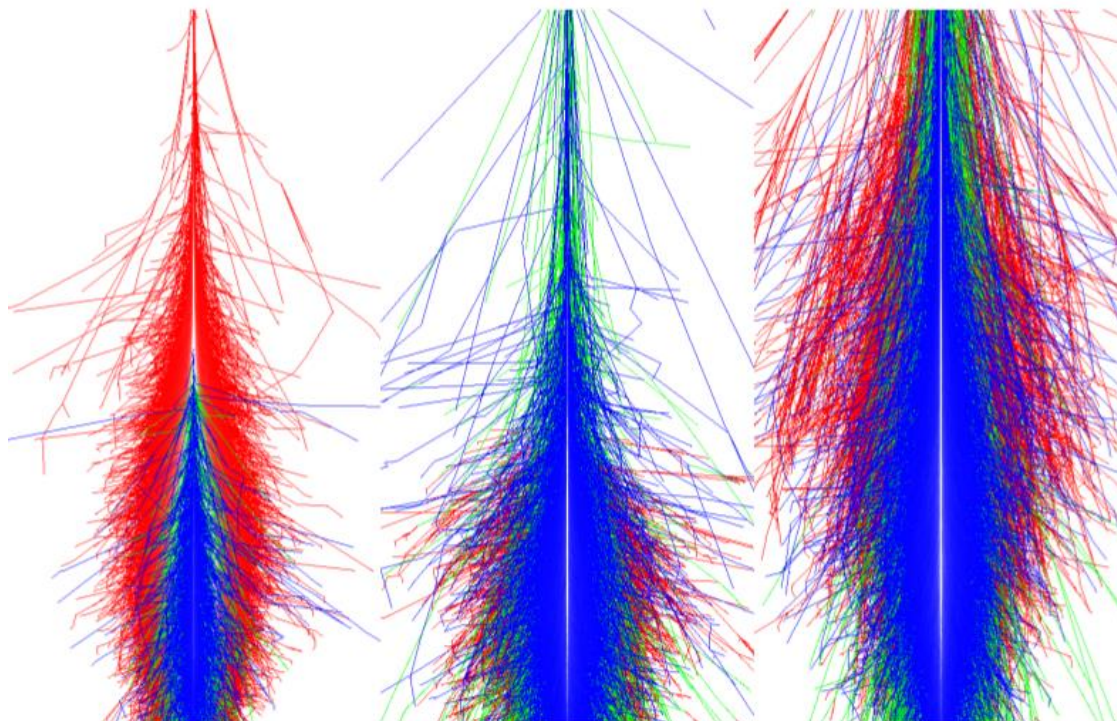
$$X(l) = \int_l^{\text{inf}} \rho(l) dl$$

Donde, además, $\rho(l)$ está dada por la ecuación barométrica para la densidad atmosférica con una temperatura $T(h)$.

$$\rho(h) = \rho(h_0) \left(\frac{T(h_0)}{T(h)} \right) \exp \left(- \int_{h_0}^h \frac{M}{R} \frac{g(h)}{T(h)} \right)$$

Siendo R la constante universal de los gases, M la masa molar del aire y $g(h)$ la aceleración debido a la gravedad a una altura h . Por construcción, el valor $X(0)$ se obtiene directamente de la presión atmosférica a nivel del mar con $P_0/g_0=101325\text{Pa}/9.81\text{ms}^{-2}=1033\text{gcm}^{-2}$ (Pérez, 2015)

Figura 2. Cascadas de área extensa producidas por un fotón (izquierda), un protón (centro) y un átomo de hierro (derecha). Los colores indican las tres cascadas principales: la parte electromagnética (rojo), muónica (verde) y hadrónica (azul)



Extraído de (Asorey, 2012)

La distribución lateral al eje de la lluvia tiene un máximo en algún lugar sobre el nivel del mar, típicamente entre 4 y 7 km. Luego de este punto de mayor radio de la cascada, la creación de partículas secundarias disminuye y la densidad de partículas también. Se caracteriza la edad de la cascada (S) alrededor de este punto máximo ($S < 1$ para antes de ese máximo, $S = 1$ cuando ocurre ese máximo y $S > 1$ para luego del máximo). (Asorey, 2012) (Suarez, 2014)

Una cascada lleva a tres componentes: electromagnético, de muones y de hadrones; 1% es de hadrones, 10% son muones y 89% son partículas cargadas (electrones y positrones). El 90% de la energía está en el canal electromagnético. El número total de partículas secundarias depende de a) la energía de la partícula primaria (12-20 órdenes de magnitud eV) b) ángulo cenital (entre 0° , vertical, y 90° , horizontal), c) punto de primera interacción. El ángulo cenital influye en gran medida, porque una partícula que ingresa a

la atmósfera con un ángulo cercano a 90 grados tiene una cascada sobre el suelo 40 veces menos energética que una que entró verticalmente. El primer punto de interacción depende además del tipo de partícula primaria. (Asorey, 2012) (Suarez, 2014)

1. Distribución de energías a nivel del suelo. Para observatorios de WCD, es importante conocer la distribución de energía de muones ya que los de energías mayores a 0.3 GeV son los que atraviesan los tanques y se usan para calibración. Otro tipo de partícula que alcanzan detectores son los rayos gamma de 100 MeV, sin embargo, el flujo de rayos gamma disminuye luego del máximo de la cascada así que únicamente detectores de gran altitud los detectan apreciablemente. (Watson, 2002)

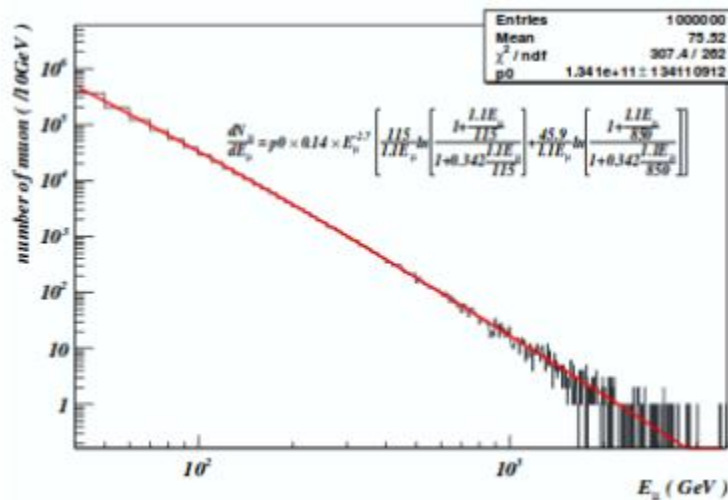
La fórmula estándar de Geisser describe la distribución energética de muones a nivel del suelo cuando la curvatura de la Tierra puede ser obviada y cuando el decaimiento de muones es despreciable. Estas condiciones son equivalentes a tomar únicamente eventos con ángulo cenital menor a 70 grados y considerar muones con energías mayores a $100/\cos\theta$ GeV. Sin embargo, la mayoría de muones encontradas a nivel del suelo tienen energías menores a este límite. El trabajo de Guan *et al.* extiende la fórmula de Geisser agregando parámetros ajustados por datos experimentales. La distribución energética dada es entonces:

$$\frac{dN}{dE} = p_0 0.14 E^{-2.7} \left[\frac{115}{1.1E} \ln \left[\frac{1 + \frac{1.1E}{115}}{1 + 0.342 \frac{1.1E}{115}} \right] + \frac{45.9}{1.1E} \ln \left[\frac{1 + \frac{1.1E}{850}}{1 + 0.342 \frac{1.1E}{850}} \right] \right]$$

Donde θ es el ángulo polar y E es la energía en GeV. Esta fórmula representa la distribución de muones de cascadas extensas a nivel del suelo. Los parámetros mencionados se ajustaron usando CORSIKA usando una densidad atmosférica de 114.8 g/cm^3 . La Figura 3 muestra esta distribución. Un ajuste de potencia a esta gráfica arroja la siguiente distribución (Guan *et al.*, 2006)

$$d(E) = (4.114 \pm 0.003) \times 10^{10} E^{-3.07143 \pm 0.00004}$$

Figura 3. Distribución de la energía de muones generada con números aleatorios basado en la fórmula de Geisser



Extraído de (Guan *et al*, 2006)

2. Simulación de cascadas de área extensa. Para realizar simulaciones cascadas de área extensa se puede utilizar el programa CORSIKA, desarrollado por el Instituto de Física Nuclear de Karlsruhe (IKP). Éste simula las distintas interacciones de las partículas que se generan a partir de una primera partícula de alta energía (partícula primaria) para así construir la cascada. (Heck, 1998)

El modelo de Heitler es un modelo simplificado que predice el comportamiento del canal electromagnético de la cascada. Los dos mecanismos de interacción que describe son el de frenado (Bremsstrahlung) y de pares: el primero es un electrón que al encontrarse con un átomo de la atmósfera desprende un electrón de menor energía y una partícula gamma, el segundo es la generación de un electrón y positrón cuando una partícula gamma se encuentra un átomo en la atmósfera. Estas interacciones cesan cuando la energía perdida por ionización del electrón es igual a su energía en reposo (otros criterios existen para para detener el proceso dentro de una simulación). (Suarez, 2014)

Para las interacciones hadrónicas de alta energía se utilizan los modelos VENUS, QGSJET, DPMJET y SIBYLL. Para las hadrónicas de baja energía utiliza GHEISHA.

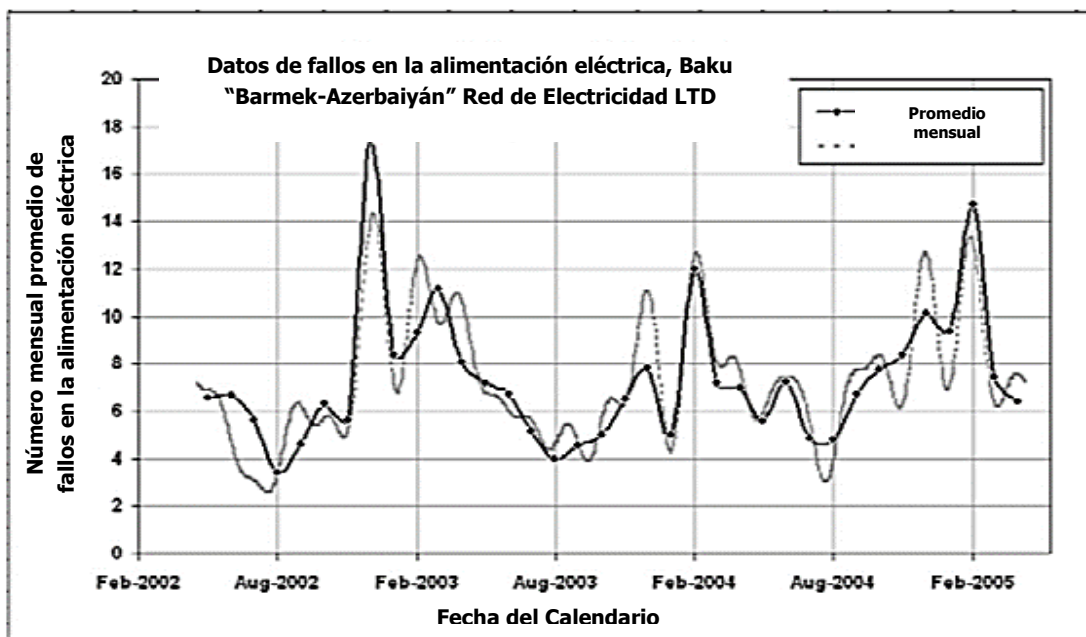
Por último, las electrónicas las simula con EGS4 y NKG. CORSIKA necesita que se le ingresen los siguientes datos: datos de la atmósfera en dónde se realizará la simulación, el sistema coordenado a utilizar, el campo geomagnético del lugar a simular y el sistema de unidades que se utilizará (Heck, 1998).

E. Efectos del clima espacial y radiación cósmica sobre la tierra

Los cambios del clima espacial pueden afectar negativamente no solo en la tecnología, pero también en sistemas ecológicos y bilógicos, incluyendo la vida y salud del ser humano. Los efectos sobre la tecnología en la superficie terrestre se deben principalmente por las variaciones del campo geomagnético. Este induce los campos geoelectrónicos, el cual es determinado por las cargas eléctricas que continuamente fluyen en la magnetósfera, ionosfera y por la estructura de la conductora de la tierra. En la Academia Nacional de Ciencia de Baku, Azerbaiyán se realizaron investigaciones sobre el impacto de las tormentas geomagnéticas en el desenvolvimiento de la industria eléctrica de Azerbaiyán. Las empresas tomadas en cuenta fueron “AzerEnerji” S.A (Compañía de energía estatal de Azerbaiyán) y “Barmek-Azerbaijan” EN Ltd (Babayev, 2006).

Se realizó el análisis con base en fallas, oscilaciones de voltaje, entre otros. La investigación se centró en los llamados “eventos solares extremos”, los cuales ocurrieron en julio del 2000, de septiembre a octubre del 2001, en abril del 2002, de octubre a noviembre del 2003, noviembre del 2004, junio del 2005, entre otros. En ellos se realizaron monitoreos diarios en los sistemas de fuentes de alimentación eléctrica y el clima espacial. Los resultados mostraron que la presencia de problemas en equipos eléctricos, apagones y perturbaciones en la línea eléctrica eran significativamente mayores solo cuando las tormentas solares eran muy fuertes. En la **Figura 4**, se pueden ver el análisis espectral de Fourier de los datos tomados diariamente y el comportamiento del sistema de distribución de potencia generados en “Barmek-Azerbaijan” EN Ltd, (en la península Absheron) en los años 2002-2005 (Babayev, 2006).

Figura 4. Datos de número de fallos promedio en el sistema de fuentes de alimentación en Azerbaiyán: la línea punteada corresponde a datos obtenidos de promedios, en ocho fechas de pequeña periodicidad llamadas modos, línea continua corresponde a promedio de cada mes designado.

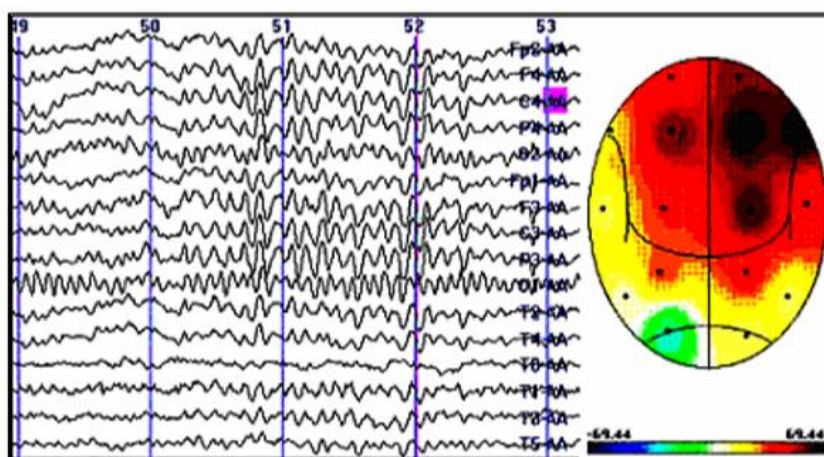


(Babayev, 2006)

En los años 2001-2005 se realizó otro estudio en la misma universidad, en el cual se analizó la influencia de las tormentas geomagnéticas (causadas por fuertes eventos solares) sobre el funcionamiento del cerebro humano. En este estudio se evaluó con un electroencefalograma, a personas entre 20 y 40 años de la misma área geográfica. Para evitar las posibles interferencias de los efectos psicológicos, tanto durante como después del experimento, los sujetos de estudio no se encontraban familiarizados con el clima espacial. La experimentación fue llevada a cabo en el sistema estándar desde el lóbulo frontal, central, parietal, occipital y temporal de ambos hemisferios del cerebro humano. Los muestreos electroencefalográficos (EEG, por sus siglas en inglés) fueron realizados en personas que fueron despertadas de forma tranquila o activa (no tranquila), en condiciones de ojos cerrados y abiertos, en estado de relajación, con foto-estimulación y en proceso de hiperventilación (**Figura 5**). Al finalizar el experimento, se determinó que existía un cambio significativo en la actividad del cerebro durante los días de tormentas

geomagnéticas fuertes, las cuales causaban cierta alteración en las funciones del mecanismo integrado y el proceso local de regulación del cerebro. Las perturbaciones geomagnéticas fuertes infringieron la actividad normal del hipotálamo, causando un desequilibrio en las interrelaciones ergo-² y trofo-³ trópico. En días con tormentas geomagnéticas débiles, el orden de esta disfunción fue bajo y se rastreó en el proceso del paso del organismo desde un estado de reposo a uno activo.

Figura 5. Ejemplo de cartograma de amplitud del electroencefalograma durante una tormenta geomagnética severa, en una medición realizada en una persona en un proceso de hiperventilación.



(Babayev, 2006)

El estrés observado en el hemisferio cerebral derecho, prueba el mayor efecto en el hemisferio derecho. Se sabe que la activación del hemisferio derecho, es acompañada por reacciones emocionales negativas. Con base en esto, es posible suponer que, durante perturbaciones significativas, por las condiciones geomagnéticas, el fondo emocional negativo de las personas es amplificado. Mientras que en los días geomagnéticamente silenciosos, un perfil de correlación refleja débiles conexiones internas e inter

² perteneciente a un estado de actividad o trabajo que afecta al músculo estriado, al sistema nervioso simpático y a la actividad cortical en ritmo alfa.

³ Relativo a una combinación de actividad del sistema nervioso parasimpático, relajación de los músculos somáticos y sincronización rítmica betacortical, tal como la que aparece en estado de reposo o sueño.

hemisféricas para estos casos. Comparando con los resultados antes mencionados, en días con severas tormentas geomagnéticas la actividad del cerebro humano se desintegra seriamente. Se rompe el funcionamiento normal de los sistemas integrativos no específicos, situados dentro de los límites del complejo limbo-reticular y responsables de la creación del correspondiente nivel de vigilia, que se dirige a la realización de la actividad óptima de la corriente de un organismo. Aparece el desequilibrio de los mecanismos de activación y desactivación, incluyendo también las disfunciones de los centros sobre-segmentarios ergo- y trofo-trópicos. Se reduce el umbral de la capacidad convulsiva (espasmódica) del cerebro humano, lo que es especialmente peligroso para las personas de alto riesgo, por lo tanto, se debe tener en cuenta para su prevención y terapia de las condiciones paroxísticas⁴ (Babayev, 2006).

Los resultados obtenidos permitieron concluir que las fuertes perturbaciones de las condiciones geomagnéticas pueden afectar negativamente al organismo humano, teniendo un efecto sobre la actividad funcional de un cerebro y cambiando su estado de fondo. Se establece que las tormentas geomagnéticas débiles y moderadas ejercen influencia estimulante, mientras que las fuertes perturbaciones de las condiciones geomagnéticas activan procesos de inhibición (Babayev, 2006).

⁴ Condiciones que generan un grado de mayor exaltación de un sentimiento, un estado de ánimo o una sensación.

V. DETECTORES DE SUPERFICIE

La modulación solar del conteo de rayos cósmicos y la posibilidad de conocer los mecanismos de aceleración y producción de RC delinea la importancia de la construcción de detectores de las partículas secundarias producidas de cascadas de área extensa. Como se describió en el Capítulo 4, las primeras detecciones de rayos cósmicos se realizaron en el aire, en globos. En la actualidad, los métodos más populares de detección son sondas en el espacio, detectores en globos, y detectores en superficie terrestre (Bernlohr, 2015).

A. Detectores en sondas y globos

Algunos de los actuales experimentos en sondas y globos son

- Cosmic-ray Energetic and Mass (CREAM): experimentos de viajes ultra largos en globo que miden la composición de rayos cósmicos en la escala de energías de 10^{15} GeV. El propósito es estudiar las características del espectro de rayos cósmicos en estas energías para establecer límites a mecanismos de aceleración por supernovas (Seo *et al*, 2004).
- Antarctic Impulsive Transient Antenna (ANITA): Circula el continente antártico a altitudes de 35-37 km. Su misión es la detección de neutrinos de ultra alta energía, y logra la detección de rayos cósmicos de 10^{19} GeV. (Hoover *et al*, 2010).
- Voyager: Su actual misión es *Voyager Interstellar Mission* encontrándose ya en la capa más externa de la heliósfera, donde la presión del gas interestelar merma los vientos solares. Estudia los campos magnéticos, las ondas de plasma y el flujo de partículas.

B. Detectores de superficie

- Fly's-Eye y Hi-Res: El experimento Fly's-Eye operó entre 1980 y 1993 en el desierto de Utah, en Estados Unidos. Era un arreglo de 67 espejos esféricos de 1575 mm de diámetro ubicados en dos sitios separados entre sí, usando la técnica de fluorescencia y la separación para triangular la dirección de los primarios. El experimento Hi-res fue una extensión del primero, utilizando espejos más

grandes, y funcionó entre 1994 y 2006. Lograron detectar primarios de hasta 10^{20} GeV.

- Observatorio Pierre Auger: La instalación más grande de detectores de agua de radiación Cherenkov es Pierre Auger, en Argentina. Consiste en 1660 tanques de agua dispuestos en una región triangular de 3000 kilómetros cuadrados, espaciados a 1500 metros. El arreglo en Pierre Auger tiene un área total de 16000m^2 y funciona a 10^8 conteos por minuto. Algunas especificaciones del modelo Scaler en Pierre Auger: Muestreo de 40MHz por seis 10-bit flash analog-to-digital converter (FADC), enlace de radio al CDAS (central data acquisition system), sistema GPS para sincronizar los 1660 tanques. La respuesta del detector está hecha para el resultado de un conjunto de simulaciones de cascadas de baja energía usando CORSIKA 6.980 modelo QGSJET-II para hadrones alta energía y GHEISHA para bajas. El flujo de partículas primarias a 100 km se simula como una ley de poder, cuyo exponente se obtuvo de mediciones de espectro de energías de la partícula primaria. (Villaseñor, 2011)

C. Radiación Vavilov-Cherenkov

Este fenómeno fue inicialmente observado por Marie y Pierre Curie en botellas de agua. Ellos la consideraron como una luminiscencia⁵, producida por los rayos gamma emitidos por los decaimientos radioactivos de átomos inestables en la *pechblenda*⁶ (Frank, 1958). Años más adelante P. Cherenkov, S. Vavilov (en 1934), realizaron publicaciones en las que describían que los rayos gamma, provenientes del decaimiento del radio, causaban una luz tenue a una dirección definida y formaba un ángulo respecto al haz de excitación. Años más adelante, I. Frank, Ig. Tamm (en 1937) realizaron publicaciones adicionales sobre este nuevo fenómeno. Finalmente, este descubrimiento les valió el Premio Nobel de Física a Cherenkov, Frank y Tamm en 1958.

⁵ Un complejo es luminiscente si emite luz tras haberse excitado electrónicamente mediante la absorción de radiación. Para que se genere este fenómeno, la velocidad de extinción de la emisión de radiación debe competir con la degradación térmica de energía mediante la pérdida de calor hacia el medio.

⁶ Mineral de óxido de uranio de fórmula general $(U_{1-x}^{4+} \cdot U_x^{6+})O_{2+x}$, con trazas de Th, Pb y tierras raras. Es de color grisáceo, pardoso o verdoso. (ITGE, 1991)

1. Descripción del fenómeno. La radiación Vavilov-Cherenkov fue clasificada como un nuevo descubrimiento, debido a que contrarresta las características comunes de luminiscencia, dirección de emisión y ángulo formado respecto a la trayectoria de las partículas. Las características principales, que la diferenciaron de la luminiscencia, se encuentran descritas en el **Cuadro 1** (Cherenkov, 1958).

Cuadro 1. Diferenciación de radiación Vavilov-Cherenkov y luminiscencia

Factor	Luminiscencia	Radiación Vavilov-Cherenkov
Alteración de movilidad de las partículas en el medio (Ej. Calentando)	Causa variación de la polarización de las partículas, y varía su intensidad.	No altera la polarización de las partículas, ni su intensidad
Disolución de materiales desactivadores de luminiscencia en el medio (Ej: KI, AgNO ₃)	Es desactivada por el efecto <i>quenching</i> ⁷ , por lo que se extingue ligeramente la luminiscencia.	No se extingue la radiación, ni varía su intensidad de emisión.

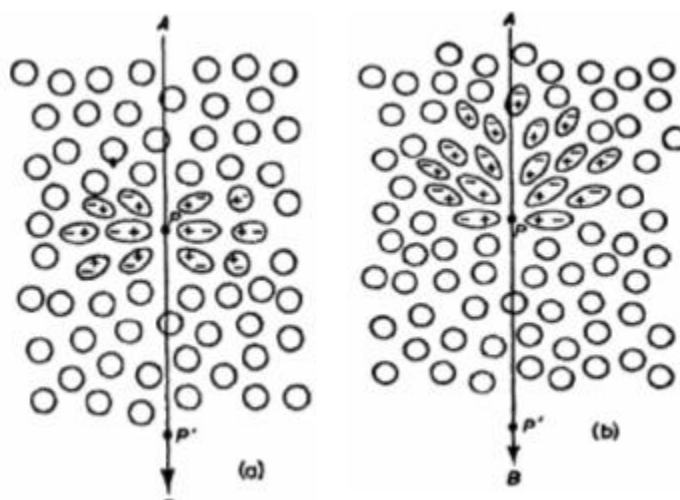
(Cherenkov, 1958).

Otro factor comparativo es la polarización de las moléculas en ambos fenómenos. Una partícula cargada moviéndose en un material puede polarizar los átomos que la circundan, ya que su campo magnético en ese instante y en ese lugar distorsiona a los átomos induciendo sus dipolos eléctricos. Esta polarización es momentánea y local, ya que cuando la partícula cargada se aleja, los átomos retornan a su forma normal (Pérez, 2009). Debido a la simetría de la polarización alrededor de la carga, el campo dipolo integrado sobre todos los dipolos se desvanece lejos de la partícula y ninguna radiación es

⁷ Efecto de desactivación de la luminiscencia, que ocurre como resultado de la donación de energía de las partículas excitadas a las que se encuentran en su estado basal, y por lo tanto transforman la energía en energía térmica (Cherenkov, 1958).

emitida (**Figura 6.a**) (Gruppen y Shwartz, 2008). Este es el caso de la polarización fluorescente (un tipo de luminiscencia), en el que la dirección del vector de vibraciones eléctricas es perpendicular al haz de excitación (Cherenkov, 1958). Entonces, si $v < \frac{c}{n}$, los dipolos se encuentran simétricamente arreglados alrededor del camino de la partícula, por lo que no varían con el tiempo (Gruppen y Shwartz, 2008).

Figura 6. a) Paso de una partícula cargada en un medio transparente con velocidades bajas. b) paso de una partícula cargada en un material transparente con velocidad mayor a la velocidad de la luz en ese material.



Extraído de (Gruppen y Shwartz, 2008)

La simetría mencionada se rompe si la partícula cargada se mueve a una velocidad mayor a la velocidad de la luz en ese medio (**Figura 6**). Es decir,

$$\beta > \frac{1}{n}$$

Donde β es la razón entre la velocidad de la partícula “v” y la velocidad de la luz “c” ($\beta = v/c$) y n es el índice de refracción del material. En este caso, las ondas radiadas por el paso de la carga producen interferencia constructiva a ciertas posiciones respecto a la carga, generando que la polarización de las moléculas en el medio sea paralela al haz de excitación (**Figura 6, b**) (Cherenkov, 1958). Entonces, el momento dipolo del medio

prevalece, ya que varía con el tiempo, causando la emisión de fotones conocida como Radiación Vavilov-Cherenkov (Gruppen y Shwartz, 2008).

2. Interpretación del fenómeno. Para la emisión de la radiación Vavilov-Cherenkov ocurre una peculiar excitación que es explicada en electrodinámica clásica y cuántica. Se sabe por electrodinámica clásica, que una partícula cargada acelerada, emite ondas electromagnéticas. En mecánica cuántica, se establece que una partícula cargada moviéndose en un medio polarizable, excita las moléculas a niveles energéticos mayores. Para que la radiación sea espontánea y el medio se encuentre en estado de energía basal, este tiene que tener un movimiento traslacional menor que la partícula cargada (Frank, 1958). Las partículas polarizadas son alineadas respecto a la partícula carga, que en el caso de moléculas con momentos dipolares permanentes se mueven con un torque respecto a la partícula, con el fin de regresar a su estado basal, las moléculas emiten la energía en forma de ondas electromagnéticas (Griffiths, 1999). Esta radiación lleva la energía de la energía cinética de la partícula; por lo que la emisión de radiación es una consecuencia de la fuerza de retroceso que ejerce el medio sobre la carga. Debido a esta fuerza, se puede considerar la interacción entre la partícula y el medio, por lo que es importante tomar en cuenta la naturaleza de este (Frank, 1958).

Por definición general, los medios se plantean como sistemas de átomos, iones o núcleos atómicos con las siguientes características:

- Son sistemas cuasi-neutrales, es decir, que la concentración de cargas, tanto negativas como positivas, serán iguales (Frank, 1958).
- Poseen momentos magnéticos o eléctricos producidos por los átomos (Frank, 1958).
- Cada partícula presenta frecuencias y oscilaciones naturales, ya que las partículas del medio se mueven independientemente. Una de las generalizaciones más comunes, es que se tome una frecuencia natural ω_0 para el sistema completo (Frank, 1958).

En un sistema con una frecuencia natural ω_0 , la radiación es emitida mediante una relación consenoidal del ángulo⁸. Si el momento de un fotón en el medio, expresado por $\frac{n\hbar\omega}{c}$, es menor que el del emisor (partícula cargada), entonces la ley de conservación del momento durante la radiación será expresada mediante:

$$\frac{n\hbar\omega}{c} \cos\theta = \frac{\Delta E}{v}$$

En donde, ΔE es el cambio de la energía cinética del emisor, “v” es su velocidad y \hbar es la constante de Plank normalizada. Al realizar la razón entre ambas, se obtiene la magnitud del cambio en el momentum del sistema. El cambio de la energía cinética ΔE es determinado por la energía del fotón irradiado $\hbar\omega$ y el cambio en la energía interna del sistema $\hbar\omega_0$ mediante:

$$\Delta E = \hbar\omega \pm \hbar\omega_0$$

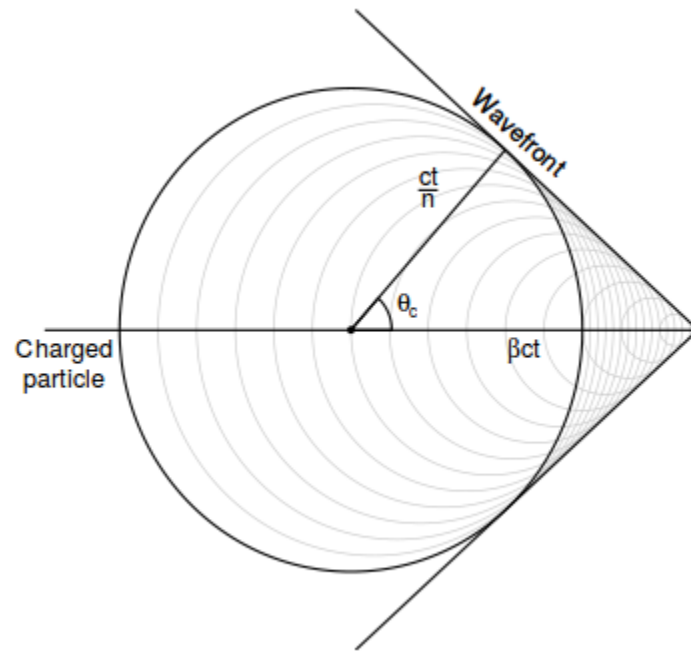
Al utilizarse el signo negativo en la ecuación, la energía es brindada por una excitación. Esto se debe a que la emisión del fotón es causada por la transición de la energía del emisor de un nivel mayor de energía a uno menor. Si se combinan las ecuaciones anteriores, se elimina la constante de Plank normalizada y por lo tanto la naturaleza cuántica del sistema también es eliminada. Cuando $\omega_0 = 0$ la frecuencia natural del medio es nula, por lo que el medio tiene una fuente de campo electromagnético independiente del tiempo (una carga eléctrica, un momento dipolo constante, entre otros). Por consecuencia, para que la radiación sea producida es necesario que la componente constante del campo sea diferente de cero (Frank, 1958). Se obtiene:

$$\cos\theta_c = \frac{1}{\beta n}$$

⁸ La teórica cuántica de la radiación de partículas cargadas moviéndose uniformemente a una velocidad excediendo la velocidad de la luz fue inicialmente desarrollada por Ginzburg y después por muchos otros investigadores. Ginzburg mostró que la forma clásica para el coseno del ángulo al que la radiación ocurre, expresa correctamente este comportamiento, en el que relaciones entre la frecuencia de la luz irradiada y su dirección de su emisión son obtenidas utilizando los métodos cuánticos y clásicos (Frank, 1958).

Tomando en cuenta lo anterior, dado un tiempo t , la coherencia en la onda está delimitada por las distancias que los fotones y la partícula recorren en ese tiempo, como en la Figura 7. La distancia que recorre la luz sería ct/n y la que recorre la partícula sería βct (Baldini, 2014).

Figura 7. Geometría relevante en la radiación Cherenkov



Extraído de (Baldini, 2014)

Por los límites de emisión de la radiación Vavilov-Cherenkov mencionados, la radiación es observable solo si $\frac{nv}{c} > 1$ (Cherenkov, 1958), por lo que:

- Valor mínimo de emisión es cuando: $\frac{v}{c} = \frac{1}{n}$ (Cherenkov, 1958)
- Valor máximo de emisión es cuando: $\frac{v}{c} = 1$ (Cherenkov, 1958)

Al combinarse la Ecuación anterior (5.2) con el valor máximo de la emisión de la radiación se obtiene que:

$$\theta^{max} = \arccos \frac{1}{n}$$

El ángulo θ^{max} , es muy pequeño para los gases ($\theta^{max} \approx 1.4^\circ$ para el aire) y se convierte más grande para medios condensados (con un ángulo de 45° para el vidrio típico) (Gruppen y Shwartz, 2008).

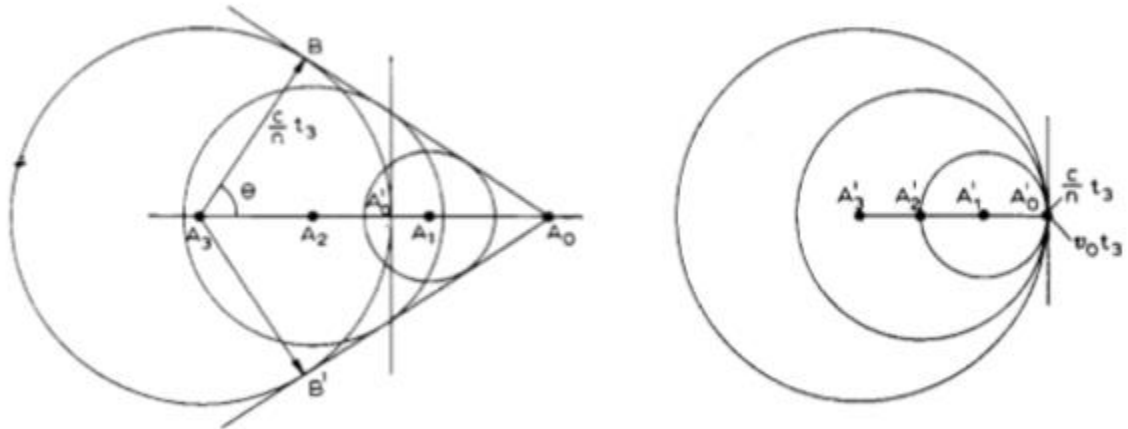
El rol de la polarización es manifestado con notoriedad en medios anisotrópicos, ya que se puede obtener la polarización de la luz irradiada dos conos de ondas normales correspondientes a los rayos ordinarios y extraordinarios en un cristal uniaxial. El umbral de la velocidad de la fuente de luz deberá ser igual a la velocidad de las ondas a lo largo del rayo en la dirección del movimiento. La velocidad de fase para la luz irradiada $u=c/n$ forman un ángulo θ con la dirección de la velocidad “v” de la partícula. Por lo que es necesario considerar que cada punto de la trayectoria de la partícula es una fuente de ondas, entonces la fase de la onda es determinada por el instante en el que la partícula atraviesa un punto. Asumiéndose que a un momento $t = -t_3$, el emisor para en un punto A_3 ; en el momento $t = -t_2$ pasa en el punto A_2 ; en un momento $t = -t_1$ en A_1 ; y finalmente en el momento $t = 0$ pasa por A_0 (**Figura 9**) (Frank, 1958).

Para rayos ordinarios, la velocidad de las ondas alrededor del rayo, como en los medios isotrópicos, es igual a la fase de velocidad de la luz c/n y no dependen de la dirección. La superficie corresponde a esferas, que tienen radios para los puntos A_3 , A_2 , A_0 de $(c/n) t_3$, $(c/n) t_2$, $(c/n) t_1$ y 0 respectivamente (**Figura 8**). La envoltura de estas esferas muestra evidentemente un cono de circular transversal en A_0 . Su generatriz que se encuentra en el plano del dibujo es AB y AB' (**Figura 8**, Izquierda). En donde la diferencia substancial entre los medios isotrópicos se encuentra relacionada con la polarización de la luz y la distribución de la intensidad, dependiendo de ella (Frank, 1958).

En la **Figura 8** es observable la magnitud del umbral de la velocidad. Cuando la velocidad disminuye, la distancia entre los puntos A disminuye (**Figura 8**, Derecha). El caso del umbral ocurre cuando el punto A_0 ocupa la posición de A_0' en la superficie de la esfera. A velocidades menores, una de las esferas se encuentra completamente dentro de la otra y no tienen una posición en común. En el caso del umbral, solo tiene un punto tangencial en común A_0' . Por lo que $(c/n)t_3=v_0t_3$, en donde $v_0=c/n$ (**Figura 8**, derecha). El cono de las ondas normales es comprimido en la dirección de la velocidad v , y el cono de

la onda se transforma en un plano perpendicular al eje de movimiento en el punto A_0' (**Figura 8**, Izquierda) (Frank, 1958).

Figura 8. Conos de emisión de radiación Vavilov-Cherenkov en medios isotrópicos.



(Frank, 1958)

En medios dispersivos (e.i que el índice de refracción depende de la longitud de onda) la luz de diferentes longitudes de onda es propagada a ángulos, aun con partículas a velocidad constante, diferentes uno del otro. Por lo que la radiación es rota en un análisis espectral. En consecuencia, el cono de radiación mostrará una intensidad determinada; en el caso de un medio con dispersión espectral normal se observará una coloración roja en la parte interna del cono y violeta en la parte externa (Cherenkov. 1958).

3. Dependencia del índice de refracción. Por la dependencia del índice de refracción de la longitud de onda de la irradiación, la radiación Vavilov-Cherenkov de longitud de onda λ requiere $n(\lambda) > 1$ (Grupen y Shwartz, 2008). Debido a que existe simetría en el ángulo azimutal, la forma del frente de onda es un cono. Usando el caso crítico cuando $\cos\theta = 1$, se puede obtener una expresión para la energía mínima de una partícula para producir radiación Cherenkov.

$$E_c = \gamma m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - n^{-2}}}$$

Para el agua, con $n = 1.33$, toma un valor aproximado de $E_c \approx 1.52m_0$. (Pérez, 2009)

El espectro (doble diferencial) de los fotones producidos por unidad de longitud x y de longitud de onda λ lo describe:

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right)$$

donde z es la carga de la partícula y α es la constante de estructura fina (Baldini, 2014). Por la proporcionalidad de $\frac{dN}{dx}$ con $1/\lambda^2$, se considera su aumento en la emisión de fotones, respecto a la trayectoria, a longitudes de onda pequeñas (Cherenkov, 1958).

La radiación de Cherenkov no es importante en términos de la energía perdida. En cambio, la existencia de un umbral de generación de radiación y la dependencia del ángulo θ y del espectro sobre la velocidad de la partícula hacen la detección de radiación Cherenkov útil para la identificación de partículas y medición de velocidades. (Baldini, 2014)

En el contexto de los detectores de rayos cósmicos terrestres en agua, las propiedades de la radiación de Cherenkov importantes son: la existencia del umbral de velocidad; la cantidad de fotones emitidos por unidad de longitud tiende rápidamente a una constante que depende de λ , n y la longitud recorrida. Es decir que la señal del detector se relaciona con la cantidad de fotones producidos, y no con la energía depositada. De hecho, muy poco porcentaje de la energía depositada en un detector de agua es por radiación de Cherenkov; alrededor del 1 % en gases de número atómico mayor a 7. En lugar, la mayor parte de la energía se pierde a través de otras interacciones de ionización y excitación. (Pérez, 2009) (Gruppen y Shwartz, 2008)

Para obtener el número total de fotones emitidos en un contador de Cherenkov, se integra la ecuación doble diferencial del número de fotones sobre toda la región en la cual se cumple $\beta n(\lambda) > 1$, y se convoluciona con la función de respuesta del sistema de recolección de luz. En el caso de los detectores de rayos cósmicos por radiación Vavilov-Cherenkov en agua (WCD por sus siglas en inglés, de ahora en adelante), el sistema de recolección de luz es un tanque de agua purificada con paredes hechas de material altamente reflector.

La integración del número de fotones N Vavilov-Cherenkov emitidos por unidad de longitud de trayectoria x con longitudes de onda entre λ_1 y λ_2 esta dada por:

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{1}{(n(\lambda))^2\beta^2}\right) \frac{d\lambda}{\lambda^2}$$

Si se omite la dispersión del medio (i.e n independiente de λ) la ecuación anterior se convierte en:

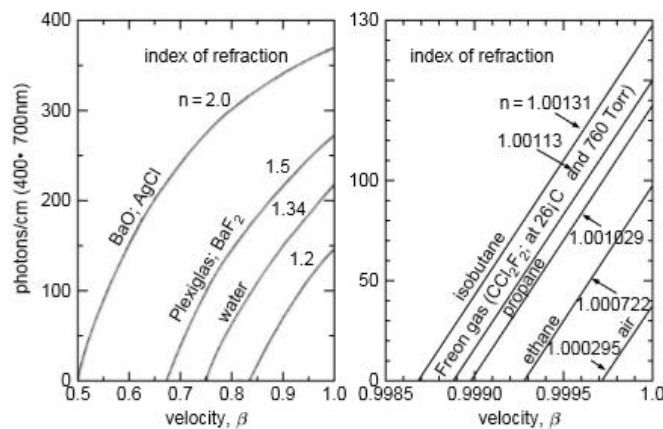
$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha z^2 * \sin^2 \theta * \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)$$

Para el rango del espectro óptico ($\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ y $\lambda_2 = 700 \text{ nm}$), para partículas con una sola carga ($z = 1$) se obtiene:

$$\frac{dN}{dx} = 490 * \sin^2 \theta \text{ cm}^{-1}$$

De la velocidad de la partícula, el material y su índice de refracción en el que es observable la radiación Vavilov-Cherenkov dependerá el número de fotones producidos por unidad de longitud de trayectoria. En la **Figura 9** se muestran algunos ejemplos de materiales de las dependencias mencionadas (Gruppen y Schwartz, 2008).

Figura 9. Número de fotones producidos por unidad de longitud de trayectoria para varios materiales en función de la velocidad de partícula.



(Gruppen y Schwartz, 2008)

El rendimiento de fotones puede ser aumentado por un factor de dos o tres, si los fotones emitidos en el rango ultravioleta también pueden ser detectados. A pesar de esto el espectro de los fotones Vavilov-Cherenkov emitidos muestran una dependencia a $1/\lambda^2$, los fotones no son emitidos en el rango de los rayos-x porque en este rango la longitud de onda es $n = 1$, por lo que la condición de la emisión de los fotones no podrá ser cumplida (Gruppen y Shwartz, 2008).

Para la obtención del número correcto de fotones producidos en un contador Vavilov-Cherenkov, la ecuación deberá ser integrada en la región en donde $\beta * n(\lambda) > 1$. Además, la función respuesta del sistema de colección de luz deberá ser tomada en cuenta para obtener el número de fotones que llegan al detector de fotones. Todos los materiales transparentes son candidatos para ser radiadores Vavilov-Chrenkov, algunos ejemplos de radiadores se encuentran presentes en la **Figura 10** (Gruppen y Shwartz, 2008).

Figura 10. Compilación de radiadores Vavilov-Cherenkov. El índice de refracción de los gases está dado por 0°C a 1 atm (STP). El sodio sólido es transparente a longitudes de onda de 200nm.

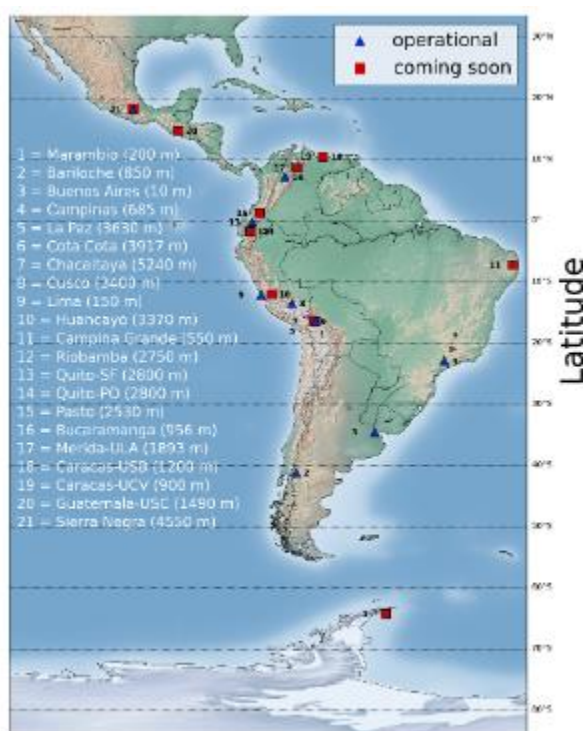
Material	$n - 1$	β threshold	γ threshold
Solid sodium	3.22	0.24	1.029
Diamond	1.42	0.41	1.10
Flint glass (SFS1)	0.92	0.52	1.17
Lead fluoride	0.80	0.55	1.20
Aluminium oxide	0.76	0.57	1.22
Lead glass	0.67	0.60	1.25
Polystyrene	0.60	0.63	1.28
Plexiglas (Lucite)	0.48	0.66	1.33
Borosilicate glass (Pyrex)	0.47	0.68	1.36
Lithium fluoride	0.39	0.72	1.44
Water	0.33	0.75	1.52
Liquid nitrogen	0.205	0.83	1.79
Silica aerogel	0.007-0.13	0.993-0.884	8.46-2.13
Pentane (STP)	$1.7 \cdot 10^{-3}$	0.9983	17.2
CO ₂ (STP)	$4.3 \cdot 10^{-4}$	0.9996	34.1
Air (STP)	$2.93 \cdot 10^{-4}$	0.9997	41.2
H ₂ (STP)	$1.4 \cdot 10^{-4}$	0.99986	59.8
He (STP)	$3.3 \cdot 10^{-5}$	0.99997	123

(Gruppen y Shwartz, 2008)

D. Latin American Giant Observatory

LAGO (Latin American Giant Observatory, por sus siglas en inglés) es un proyecto internacional con más de ochenta científicos de ocho países latinoamericanos que empezó en 2005. Está orientado principalmente a la investigación básica de tres ramas de la astrofísica de partículas: el universo en condiciones extremas, clima interplanetario y radiación atmosférica a nivel del suelo. La red de detectores de LAGO consiste en pequeños tanques de agua a nivel de tierra sobre diferentes localidades y latitudes a lo largo del continente latinoamericano, abarcando desde México hasta el cono sur de América. El proyecto LAGO se ha dividido en dos estudios objetivos dependiendo de la altitud del detector. Los detectores en altitudes superiores de 4,500m sobre el nivel del mar permiten detectar GRB con mayor sensibilidad; y los detectores de altitudes menores son utilizados para estudios físicos del Sol (decrecimientos Forbush). (Asorey y Dasso, 2012)

Figura 11. Distribución geográfica de los detectores de LAGO operacionales (triángulos), y los que comenzarán a funcionar entre 2016 y 2017 (cuadrados)

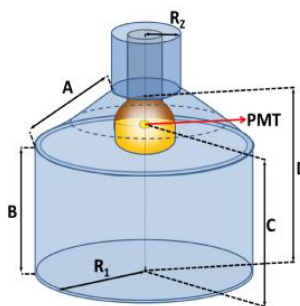


(Asorey y Dasso, 2012)

LAGO tiene como objetivo observar Gamma Ray Bursts (GRB) (destellos de rayos gamma) utilizando WCD. Los detectores de LAGO pueden ser utilizados para medir el flujo de rayos cósmicos en la tierra ya que su modulación es una medición directa de la actividad solar. Por último, los detectores instalados en universidades sirven para enseñar a estudiantes sobre física de partículas y astropartículas. Existen ya varios observatorios de LAGO en operación. Uno de ellos está en Sierra Negra, México, a 4550 metros sobre el nivel del mar. Tiene funcionando tres tanques de 4 metros cuadrados de superficie y dos de un metro cuadrado. Otro está en Chacaltaya, Bolivia, a 5250 metros sobre el nivel del mar, el detector a mayor altitud de la estructura LAGO. Tiene tres tanques en operación, dos de 4 metros cuadrado y uno de 1 metro cuadrado. El otro está en Marcapomacocha, Perú, a 4450 metros sobre el nivel del mar, con un tanque de dos metros cuadrados en operación desde el 2010. En Guatemala, ya dio inicio el proyecto en la Universidad San Carlos de Guatemala, pero aún no está en operación. (Villaseñor, 2011)

1. Detectores Cherenkov de LAGO. La base de los detectores en LAGO es un tanque cilíndrico de material como resina de polietileno. Está recubierto en el exterior por una capa de material que evita el ingreso de luz externa, como manto asfáltico o plástico de polietileno negro. La superficie interior está recubierta por una manta de Tyvek, que es un material altamente reflectivo. La superficie del Tyvek consiste en fibras de polietileno de alta densidad de 5-10 μm orientadas de forma aleatoria y no direccional. Dentro, se llena con agua purificada. (Pérez, 2009) (Dupont, 2009)

Figura 12. Diagrama de un detector típico de la colaboración LAGO

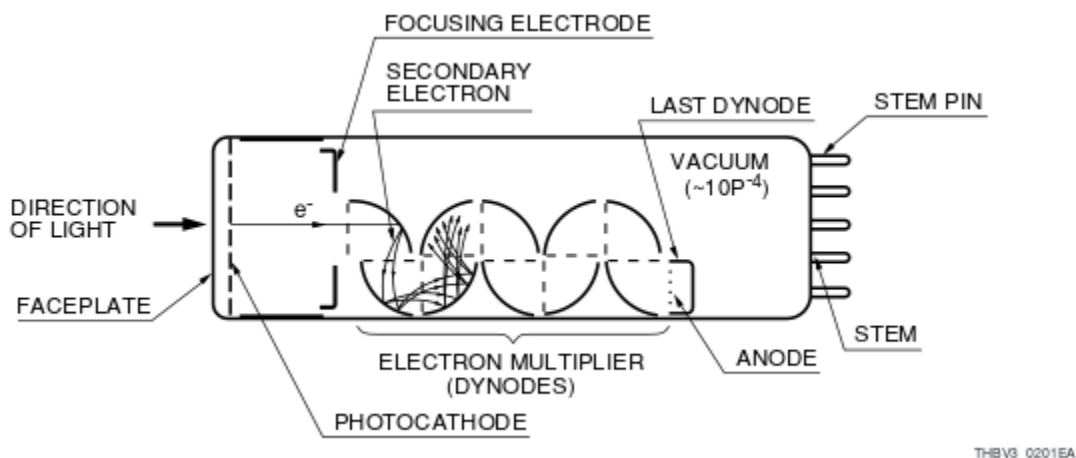


Extraído de (Pérez, 2009)

Algunas ventajas del Tyvek es que no se degrada en contacto con agua y tiene buena resistencia mecánica, pero su propiedad más importante es que tiene una reflectividad en aire en el espectro visible del 90%, y disminuye a 86% a 360nm y al 78% a 320nm; rangos en los que se encuentra la longitud de onda de emisión de radiación Vavilov-Cherenkov y la sensibilidad normal del fotomultiplicador (PMT, por sus siglas en inglés, de ahora en adelante). Generalmente se coloca el PMT en la tapa superior del tanque. El agua entra en contacto únicamente con el Tyvek y con el vidrio de detección del fotomultiplicador. (Pérez, 2009)

El agua, junto al Tyvek y el fotomultiplicador, constituyen el sistema de recolección de fotones de la radiación Cherenkov que ocurre en el agua. Estos fotones son reflejados en las paredes del Tyvek hasta alcanzar el fotomultiplicador. De hecho, un bajo porcentaje de fotones logra alcanzar el fotomultiplicador. Este porcentaje se aproxima como el cociente del área de detección y el área superficial interna del tanque. La cantidad de fotones detectados son suficientes para generar una señal distinguible en el detector. El constante mantenimiento de la calidad del agua facilita la calibración de los tanques, ya que se ha observado que la degradación de la calidad de agua disminuye la capacidad del sistema de recolección de fotones. (Pérez, 2009)

2. Tubo fotomultiplicador (PMT). Los tubos fotomultiplicadores son detectores al vacío extremadamente sensibles a luz en el rango visible, ultravioleta e infrarrojo. Logran amplificar la corriente producida por luz incidente hasta 100 millones de veces, por lo que son capaces de detectar pocos fotones incidentes. Consisten en una ventana de ingreso (un vidrio de borosilicato, por ejemplo), un fotocátodo, un electrodo para enfocar, un multiplicador de electrones (dínodos en secuencia) y un ánodo, todo sellado en un tubo de vidrio al vacío. El diagrama en la **Figura 13** Extraído de (Hamamatsu, 2007) muestra la construcción básica de un PMT. (Hamamatsu, 2007)

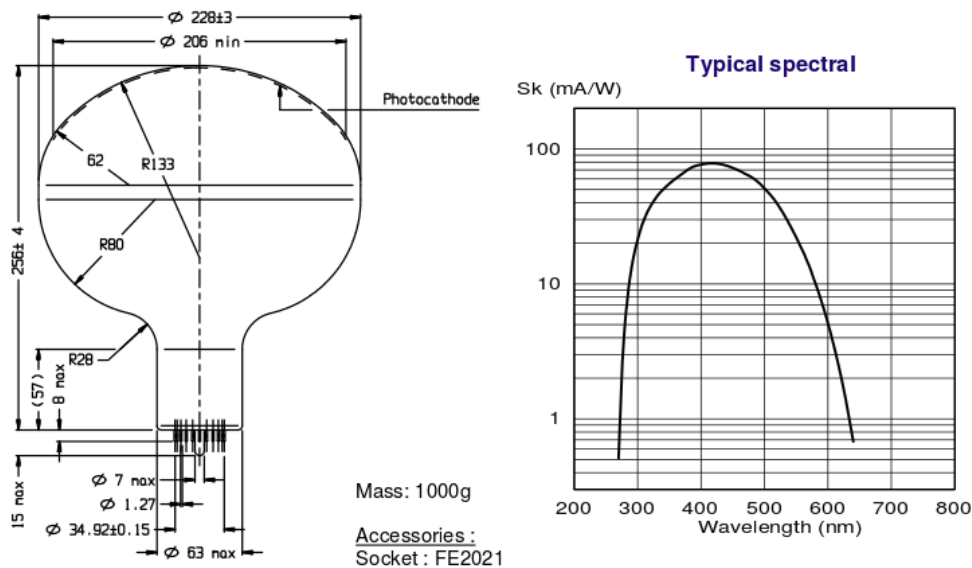
Figura 13. Construcción básica de un PMT

Extraído de (Hamamatsu, 2007)

Primero, la luz ingresa por la ventana de vidrio. Al chocar con el fotocátodo, los fotones excitan y desprenden fotoelectrones por efecto fotoeléctrico hacia el vacío del tubo. El electrodo acelera y dirige esta corriente hacia los dínodos. Estos constituyen el multiplicador de electrones: entre los dínodos se coloca un alto voltaje, que provoca que los electrones incidentes sean multiplicados por efecto de emisión secundaria de electrones. (Hamamatsu, 2007)

El multiplicador de electrones es el responsable de producir la dramática amplificación de corriente, porque cada dínodo contribuye a una cascada multiplicativa de electrones: para un fototubo de N_d dínodos, la corriente final habrá tenido una ganancia de δ^N , con δ siendo típicamente alrededor de 6-7 electrones. En LAGO, se usan fototubos con un área de detección de alrededor de 9 pulgadas y multiplicadores de electrones de 10-12 dínodos. El ánodo es un electrodo que recolecta los electrones secundarios multiplicados en el proceso de cascada y arroja la corriente a un circuito externo. Lo más importante en el diseño del ánodo es una diferencia de potencia adecuada entre el último dínodo y el ánodo para obtener la mayor corriente de salida. (Hamamatsu, 2007)

Figura 14. Diagramas de a) la construcción básica de Photonis XP1802 con dimensiones dadas en mm y b) su espectro de radiación



Extraído de (Photonis, SF)

Una propiedad importante de un PMT es su eficiencia cuántica o su espectro de radiación. Ambos miden la eficiencia del PMT de convertir la energía de los fotones en corriente. La eficiencia cuántica mide el cociente entre la cantidad de fotoelectrones emitidos por el fotocátodo y el número de fotones incidentes, expresado en porcentaje. El espectro de radiación mide la corriente de electrones producido por el fotocátodo dividido el flujo de radiación para alguna longitud de onda, y se mide en amperios por vatio. La conversión entre eficiencia cuántica (QE_λ) y espectro de radiación (R_λ) es

$$QE_\lambda = R_\lambda \frac{E_\lambda}{e} = \frac{R_\lambda hc}{\lambda e}$$

donde λ es la longitud de onda de la luz incidente, $E_\lambda = \frac{hc}{\lambda}$ es la energía del fotón incidente, e es la carga elemental, c es la velocidad de la luz en el vacío y h es la constante de Planck.

Por el efecto fotoeléctrico, la probabilidad de emisión aumenta para longitudes de onda más bajas (ya que estos fotones poseen más energía). Por esto, la eficiencia cuántica está dada respecto a la longitud de onda de los fotones incidentes. En este megaproyecto

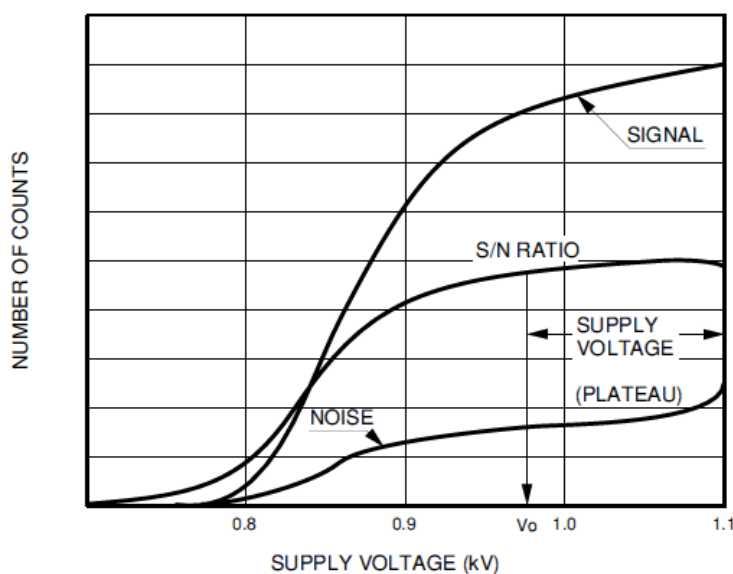
se utilizó un PMT marca Photonis XP1802, cuyo espectro de radiación y construcción básica están dados en la **Figura 14**. La eficiencia cuántica de este PMT es de 23% a una longitud de onda de 420nm. (Hamamatsu, 2007) (Photonis, SF)

a. Selección de fotomultiplicadores. Es importante conocer de antemano las condiciones de luz incidente a medir. Después, elegir el fotomultiplicador que está más adecuado para detectar la incidencia de luz y poder elegir las condiciones óptimas del circuito que encajan en la aplicación. La elección del fotomultiplicador se puede clasificar dependiendo de las siguientes características:

- Longitud de onda de la luz incidente: Para esta propiedad dos partes del fototubo se deben considerar: el material del vidrio y la respuesta espectral del fotocátodo. Todos los materiales tienen propiedades de reflexión y absorción de la radiación electromagnética. Dependiendo de la frecuencia que contenga la onda, los materiales tienen diferentes índices de reflexión y absorción. Por lo tanto, el material del vidrio se debe tener en cuenta a la hora de seleccionar la aplicación del fototubo. Además, es necesario conocer la respuesta espectral del fotocátodo, ya que dependiendo de esta propiedad, así será la respuesta a la eficiencia de conversión fotoeléctrica.
- Intensidad de luz: Para la intensidad de luz se tienen tres consideraciones: El número, tipo y voltaje aplicado a los dínodos. Los dínodos son los encargados de la multiplicación del efecto fotoeléctrico del fotocátodo. Así que este arreglo de configuraciones es importante a tenerlo en cuenta dependiendo de cuán intensa es la incidencia de la luz — y por consiguiente la intensidad del efecto fotoeléctrico producido.
- Tamaño del área de incidencia del rayo de luz: Con esta propiedad se tiene que tomar en cuenta el diámetro efectivo de recepción. Si no es lo suficientemente grande o es muy pequeño para el área de incidencia, se puede tener una medición que no se adecua para la aplicación para la cual se adquirió el fotomultiplicador.
- Velocidad del fenómeno óptico. Para esta última consideración, se tiene que tomar en cuenta el tiempo de respuesta del fotomultiplicador, para que pueda responder correctamente a la detección del evento (Hamamatsu, 2007).

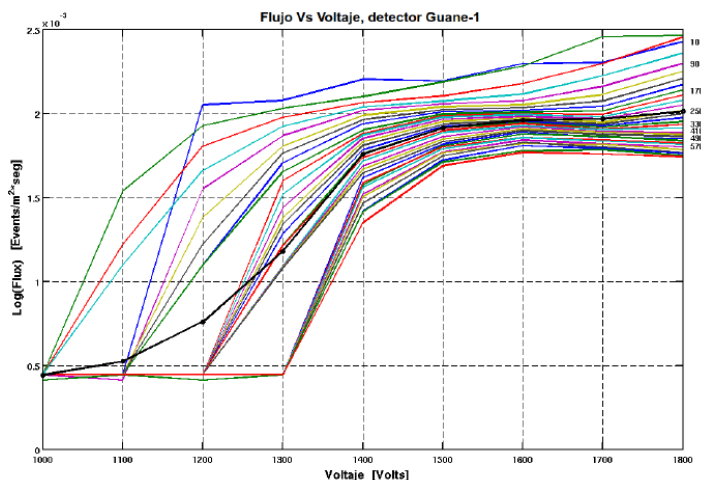
b. Calibración de fotomultiplicadores. Calibrar fotomultiplicadores es conocer la relación entre la energía depositada por las partículas al atravesar el detector y la señal digital que se obtiene después de atravesar toda la cadena electrónica. Para conocer la región estable del PMT, se puede establecer un rango de voltajes a medir y barrer gran parte de la región de detección con un aumento gradual de voltaje. Se tiene que realizar lo mismo para cada nivel de umbral de la electrónica para poder tener datos concluyentes. (Castellanos, 2005).

Figura 15. Ejemplificación de las salidas esperadas cuando el PMT se encuentra aislado de luz externa.



Extraído de (Hamamatsu, 2007)

Figura 16. Calibración del detector Guane-1 en Colombia. Cada curva representa el barrido en voltajes para un umbral determinado. La región estable del PMT se observa entre 1500 y 1700V.



Extraído de (Durán, 2011)

3. Electrónica de LAGO

a. Digitalización y adquisición. La adquisición de datos es un proceso en el cual, por medio del muestreo, señales analógicas que miden objetos o condiciones en el mundo físico son transformadas a señales digitales con valores numéricos que pueden ser manipulados por computadoras. Los sistemas de adquisición (o DAQ, por sus siglas en inglés) incluyen sensores que miden parámetros físicos, circuitos electrónicos para conversiones analógicas necesarias y convertidores analógico a digital (ADC, por sus siglas en inglés), que se encargan de digitalizar los datos (Young, 2001).

La digitalización o digitalizar es la representación de un objeto, imagen, sonido, señal analógica etc. generando una serie de puntos discretos o muestras que representen a ese objeto con una imagen en el dominio discreto. En la actualidad, el proceso de digitalización se realiza por medio de los números binarios, lo cual facilita el procesamiento en computadoras y otras operaciones. Pero hablando generalmente, cualquier conversión analógica a un formato numérico puede ser considerada como digitalización (McQuail, 2000).

La digitalización es de suma importancia en el almacenamiento, procesamiento y transmisión de datos, pues permite todo tipo de información de cualquier índole la poder ser transportada con la misma o mejor eficiencia — contrario a los datos analógicos, que usualmente pierden calidad cada vez que son copiados o retransmitidos. La información digital puede, en teoría, ser propagada indefinidamente con ningún grado de degradación en absoluto (McQuail, 2000). Esto se sabe en la práctica que no pasa, ya que, en la comunicación digital, los mensajes llegan de transmisor a receptor con un error correlativo que se propaga si no se corrige por medio de algún algoritmo.

Las señales analógicas son generalmente continuas, tanto en valor como en el dominio y rango que puede tener en un intervalo de tiempo dado. Sin embargo, las señales digitales son discretas en ambos sentidos (generalmente son una secuencia finita de enteros) por lo que la digitalización solo puede ser una aproximación de lo que la señal en el dominio continuo representa (Flew, 2008). La digitalización ocurre en dos partes:

- **Discretización:** Es la lectura de una señal analógica cualquiera, que muestrea los valores de la señal en cada punto dado a intervalos regulares de tiempo (frecuencia de muestreo). Cada lectura se llama muestra y puede considerarse que tiene una precisión infinita en esta etapa.
- **Cuantificación:** Es el proceso posterior a la discretización, donde las muestras se redondean a un conjunto fijo de números (como números enteros). El objetivo de este es cuantificar con *bits* dichos valores de amplitud mediante los niveles de cuantificación.

Todo esto debe cumplir el teorema de Nyquist, que dice que la frecuencia de muestreo de un sistema digitalizador debe ser al menos el doble que la frecuencia natural de la señal. De esta manera, Nyquist propuso que una señal podía ser reconstruida de manera que pueda ser reconocida si se cumple su teorema. Del mismo teorema de Nyquist también se puede deducir que a medida que la frecuencia de muestreo sea mucho mayor que la frecuencia natural, la reconstrucción de una señal puede ser más fiel.

b. Procesamiento de datos. El procesamiento de señales es el uso del procesamiento digital, como el de computadoras, para realizar una amplia variedad de

operaciones con las señales. Las señales procesadas de esta manera son una secuencia de números que representan muestras de una variable continua en el dominio discreto. A pesar que el procesamiento de señales digitales es más complejo que el de señales analógicas, gracias al desarrollo del poder computacional a lo largo de los años, las ventajas del procesamiento digital son variadas como la detección y corrección de errores en la transmisión de datos — algo que en la comunicación analógica es más complicado (Oppenheim, 1998).

El procesamiento digital más común es la transformación y mejoramiento de una señal de entrada a través de un medio llamado filtrado. El filtrado digital generalmente consiste en una serie de transformaciones de las muestras alrededor de la muestra actual de la entrada o salida. Existen filtros lineales que son matemáticamente una transformación lineal de las muestras. Existen otras categorías de filtros como los causales, estables, invariantes en el tiempo, de respuesta finita o infinita, etc. (Oppenheim, 1998).

c. Diseño de PCB. En electrónica, una placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés), es una superficie utilizada para armar circuitos en espacios más compactos y más eficientes en su proceso de montaje y producción. Está constituida por *tracks* o caminos de un material conductor sobre una base no conductora, *pads* o vías para conectar capas entre sí y agujeros para el montaje de componentes (Mitzner, 2009).

La organización IPC (*Institute for Printed Circuits*) ha generado un conjunto de estándares relacionados que regulan el diseño, ensamblado y control de calidad de los circuitos impresos, siendo la familia IPC-2220 una de las de mayor reconocimiento en la industria. Otras organizaciones también colaboran como el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI, por sus siglas en inglés), Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), Alianza de Industrias Electrónicas (EIA), entre otros (Mitzner, 2009).

La mayoría de tarjetas para circuitos impresos se hacen adhiriendo una capa de cobre sobre todo el sustrato, a veces en ambos lados y luego retirando el cobre no deseado después de aplicar una máscara temporal, dejando sólo las pistas de cobre deseado. Otros

circuitos impresos son fabricados al agregar las pistas al sustrato, que es contrario al procedimiento anterior. Algunos circuitos impresos tienen capas con pistas en el interior de este, y son llamados circuitos impresos multicapas. Estos son formados al sobreponer tarjetas delgadas que son procesadas en forma separada. Después de que la tarjeta ha sido fabricada, los componentes electrónicos se soldan a la tarjeta. Algunos métodos típicos para la producción de circuitos son:

- Impresión serigráfica, que utiliza tintas resistentes al grabado para proteger la capa de cobre, retirando el cobre no deseado.
- Fotograbado, que utiliza una fotomecánica y grabado químico para eliminar la capa de cobre del sustrato.
- Fresado de circuitos, donde se utiliza una fresa mecánica de 2 o 3 ejes para quitar el sobre del sustrato.
- Impresión en material termosensible, que transfiere a través de calor a la placa de cobre (Mitzner, 2009).

La tecnología de montaje superficial fue desarrollada en la década de 1960 y se hizo popular en todo el mundo a mediados de la década de 1990. Los componentes fueron mecánicamente rediseñados para tener pequeñas pestañas metálicas que podrían ser soldadas directamente a la superficie de los circuitos impresos. Los componentes se hicieron mucho más pequeños y el uso de componentes en ambos lados de las tarjetas se hizo mucho más común, permitiendo una densidad de componentes mucho mayor (Coombs, 2001).

Existen software para el desarrollo de diseño de PCB como Altium[®]. Altium Limited es una compañía de software de propiedad pública australiana que proporciona software de diseño electrónico basado en PC para diseño amateur y profesional. Altium entendió que la industria se movía hacia el uso de nuevas tecnologías que fueran accesibles, como los FPGA en vez de componentes individuales como los PCB. Creó entonces su software insignia que es Altium Designer, un software que unifica soluciones de diseño electrónico como diseño de PCB, programación de PCB, sistemas embebidos, entre otros (Morris, 2007).

Altium entrega las herramientas para los diseños electrónicos que exigen el más alto grado de rendimiento en productividad. Cuenta con herramientas como el diseño de esquemáticos de circuitos, simulaciones de todo tipo para hacer pruebas de un circuito esquemático antes de elaborar el *layout* del PCB que se desea. *Footprints* personalizadas y diseño de caminos y vías de manera que el PCB sea eficiente en espacio y manufactura.

d. Placa digitalizadora LAGO. El PCB diseñado por LAGO para la adquisición de datos utiliza conversores analógicos digitales tipo flash de 10-14 bits de la marca Analog Devices® que pueden muestrear a una frecuencia de muestreo de 40MHz. El valor de ADC pico, ADC_p corresponde al valor de salida del FADC, en un rango de 0 a $2^{10-1}=1024$ cuentas. El rango de entrada para esto es entre 0 a 2 V. A partir de esto, se tiene la equivalencia:

$$1bin \equiv \frac{1}{40MHz} = 25ns$$

$$1ADC_p \equiv \frac{2V}{2^{10}} = 1.95mV$$

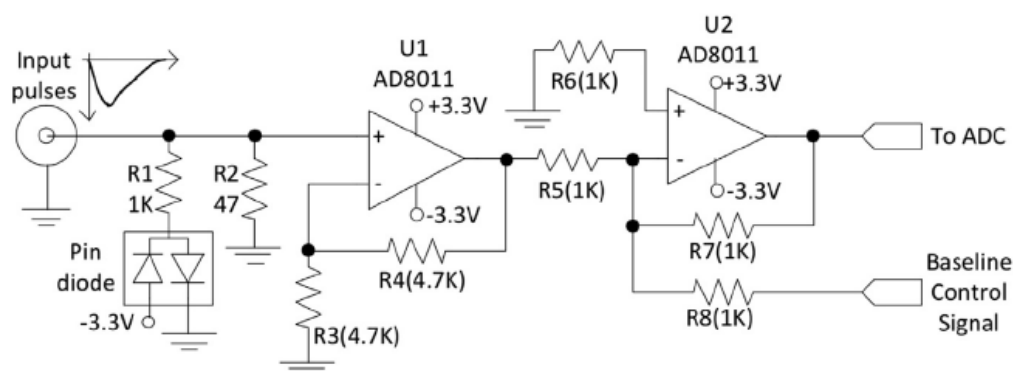
Cuenta con tres canales de adquisición independientes y simultáneos que permiten controlar hasta tres detectores en un mismo lugar. Además, pueden controlar independientemente la señal de control del alto voltaje del PMT. Esto permite hacer estudios de correlación entre los detectores, que pueden trabajarse a nivel macro agregando a cada detector una señal de GPS a 1PPS. También se agrega un sensor de presión y temperatura para hacer correcciones en las mediciones (Pérez, 2015).

La adquisición depende de un algoritmo de disparo en el que todos los pulsos con una amplitud sobre el nivel requerido se almacenan localmente y luego se transfieren a la computadora. Con esta configuración, la velocidad máxima de adquisición está en el orden de 10^5 pulsos por segundos. Adicionalmente el sistema puede ser operado en un modo donde sólo la amplitud máxima y la carga de cada pulso son almacenadas, llegando a una tasa de adquisición de 10^6 pulsos por segundo (Sofó Haro, 2016).

La placa digitalizadora se alimenta con 12V que provee la NEXYS-2. Ofrece la posibilidad de distribuir su voltaje de entrada en las bases del PMT con lo que toda la

electrónica puede ser operada con una única fuente de poder. Cada canal de adquisición posee tres etapas. Un amplificador de voltaje implementado con un amplificador de corriente de retroalimentación en una configuración no invertida, que además actúa como un filtro anti-alias. La segunda etapa es un sumador que se utiliza para la suma de la salida de un circuito de estabilización de *baseline* y actúa con un inversor de polaridad de pulsos para cazar con la entrada esperada para el ADC. En la tercera etapa se encuentra un chip ADC AD9203 que digitaliza los pulsos analógicos del detector. (Sofó Haro, 2016).

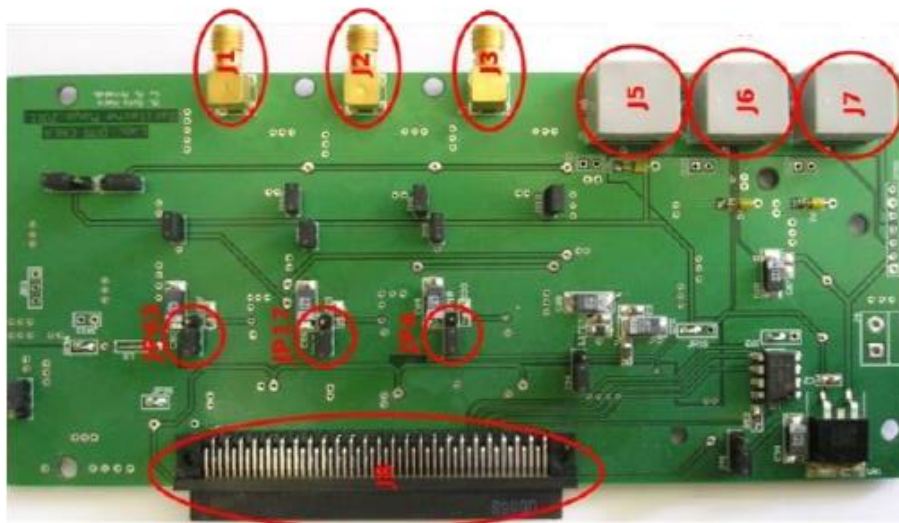
Figura 17. Diagrama esquemático de un canal de adquisición en la placa digitalizadora LAGO.



Extraído de (Sofó Haro, 2016)

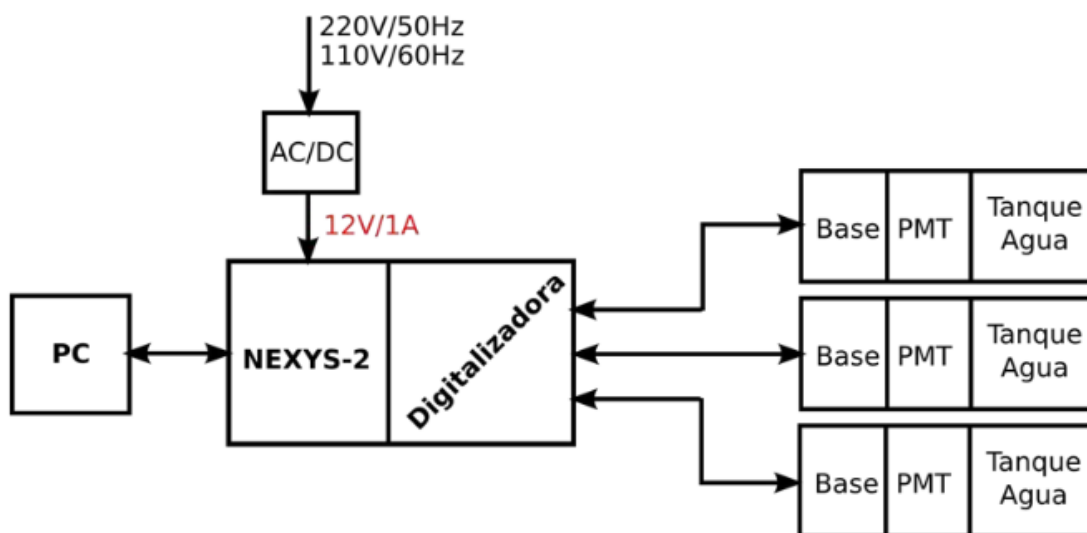
Una etapa de *front-end* encargada de hacer la corrección de la línea de base es necesaria debido a la naturaleza del experimento, que detecta partículas a nivel de suelo con gran precisión. Este diseño de estabilización responde contra los efectos ambientales. Dado que el sistema de disparo compara el voltaje instantáneo de cada canal con el voltaje de referencia, cualquier cambio en el nivel en la línea de base puede alterar las mediciones. Para evitar este fenómeno y el ruido eléctrico, la electrónica *front-end* mantiene el valor de la *baseline* en un valor estable de 50 ADC bins (~ 49 mV) agregando un voltaje de offset en la segunda etapa de cada canal de adquisición. El valor del *offset* es generado por la FPGA y es aplicado por medio de un convertidor digital a analógico (DAC, por sus siglas en inglés). Este voltaje es sumado a cada señal de entrada de cada canal de adquisición para lograr un control automático de la línea base. La FPGA actualiza el *offset* cada 2 ms (Sofó Haro, 2016).

Figura 18. Placa digitalizadora LAGO. J1 a J3 son los canales de adquisición. J5 a J8 son las salidas para el control del PMT. J8 es el conector Hirose FX2.



Extraído de (Arnaldi, 2011)

Figura 19. Diagrama de bloques de la electrónica LAGO para tres tanques, mostrando el kit de desarrollo Nexys 2 conectada a una fuente externa y la tarjeta digitalizadora.



Extraído de (Sofo Haro, 2011)

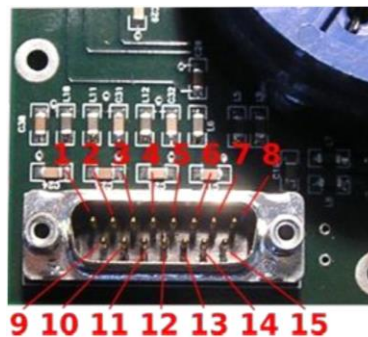
e. **Base del PMT.** Actualmente se utiliza una variedad de fototubos en la colaboración, pero en su mayoría son Photonis XP1802 y en menor medida Hamamatsu R5912 y ElectronTube 9353, todos rescatados del arreglo de ingeniería del observatorio Pierre Augier. Las bases de los PMT también son rescatadas de Pierre Augier. La alta tensión se genera con una fuente EMCO C20, cuya salida va alcanza valores hasta 2000V. En LAGO, son importantes dos conectores de la base. El conector SMA donde salen los pulsos del ánodo, el conector DB15, donde se suministran las tensiones de alimentación y de control de la alta tensión. Hay que tener en cuenta que la salida de la base del fototubo entrega pulsos negativos que son invertidos en la etapa de adquisición (Arnaldi, 2011).

Figura 20. Ejemplo de una base de un PMT de LAGO. En rojo se marca el conector SMA donde salen los pulsos del ánodo del PMT.



Extraído de (Arnaldi, 2011)

Figura 21. Conector db15 plano de una base PMT de LAGO. Los pines están enumerados dependiendo de la conexión específica que requiere la placa.



Extraído de (Arnaldi, 2011)

Cuadro 2. Tabla de conexión de la base PMT de LAGO.

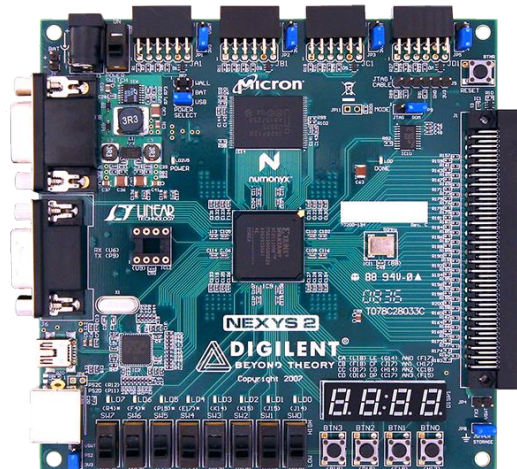
Número de Pin	Conexión requerida por el pin
1	Conexión a +3.3V
2	Conexión a -3.3V
3	Conexión a +5V
4	Conexión a +12V
5	Se debe conectar a la tensión de control de HV, que varía entre 0V a +2.5V
6	NC
7	NC
8	NC
9	Conexión a GND
10	Conexión a GND
11	Conexión a GND
12	Conexión a GND
13	Conexión a GND
14	NC
15	NC

f. Nexys 2. La tarjeta Nexys 2 es una plataforma fabricada por la empresa Digilent, basada en una FPGA diseñada por Xilinx llamada Spartan 3E. Cuenta con un puerto USB 2.0, 16 MB de RAM y ROM, y distintos dispositivos de entradas y salidas. Adicionalmente tiene embebido un procesador diseñado por Xilinx llamado Xilinx MicroBlaze. La tarjeta cuenta con un oscilador interno de 50 MHz y se puede hacer eso de sus entradas y salidas en los puertos PMOD, Hirose FX2, ocho LEDs, ocho switches, cuatro botones, y cuatro displays de siete segmentos. La Nexys 2 puede ser alimentada por una batería, un conector USB y por un conector de 12 V de 2.1 mm (Digilent, n/a).

Esta tarjeta se utiliza en la electrónica LAGO para tratar los pulsos digitalizados. LAGO diseñó el sistema ACQUA en noviembre del 2015, con este sistema se tendría el

mismo firmware en las FPGA en cualquiera de los sitios de la colaboración; antes cada sitio tenía una versión diferente del firmware. El firmware es un conjunto de instrucciones que realizan el ordenamiento de la lógica interna de la FPGA, en el caso de LAGO, el firmware está compuesto por bloques de código escritos en VHDL. Con esta tarjeta se genera el PWM con el que se controla el alto voltaje de dos canales de la tarjeta de adquisición, se envían los datos a una PC por medio del USB 2.0, se comunica con el sensor de GPS y sensor de temperatura y presión. En la Nexys 2 se decide si un pulso será tomado como un evento y pasado a la computadora. La Nexys recibe un valor de trigger o disparador, que tendrá como parámetro. Si el pulso recibido de la placa de adquisición pasa este trigger entonces el pulso digitalizado será enviado a la computadora. Este mismo se maneja de manera digital, ya que interesa saber los valores previos a un pulso sabiendo así, como se encontraba la baseline antes del evento. Para que el trigger pueda accionarse debe pasar por una serie de comparadores, si un dato muestreado es más grande que el anterior y el siguiente dato es más grande y pasa el valor de trigger, entonces la señal será tomada como un evento y se enviarán tanto los dos puntos anteriores al que accionó el trigger y los siguientes diez pulsos, teniendo un total de doce pulsos por evento (Arnaldi, 2016).

Figura 22. Vista de planta de la tarjeta Nexys 2.



4. ACQUA y ANNA de LAGO. ACQUA es un sistema de adquisición de datos desarrollado para el proyecto LAGO que tiene como objetivo estandarizar el formato y análisis de los datos adquiridos por las diferentes estaciones. Cada estación del proyecto LAGO puede utilizar este código además para subir sus datos al repositorio central. El código sirve para operar la electrónica, identificando los datos adquiridos con las características importantes de la estación. Estas incluyen la posición geográfica, altitud, institución, modelo de PMT, número de detectores, geometría del detector y otras especificaciones de electrónica.

Figura 23: Formato de un pulso en el archivo crudo producido con el sistema de adquisición ACQUA

```
# x h 08:47:41 23/08/2016 1471942061
50 51 50
50 51 50
50 50 314
50 50 281
51 50 110
51 50 71
50 50 63
50 50 52
50 50 52
50 50 53
50 50 53
50 50 52
# t 4 584
# c 1038
```

(Fuente Propia)

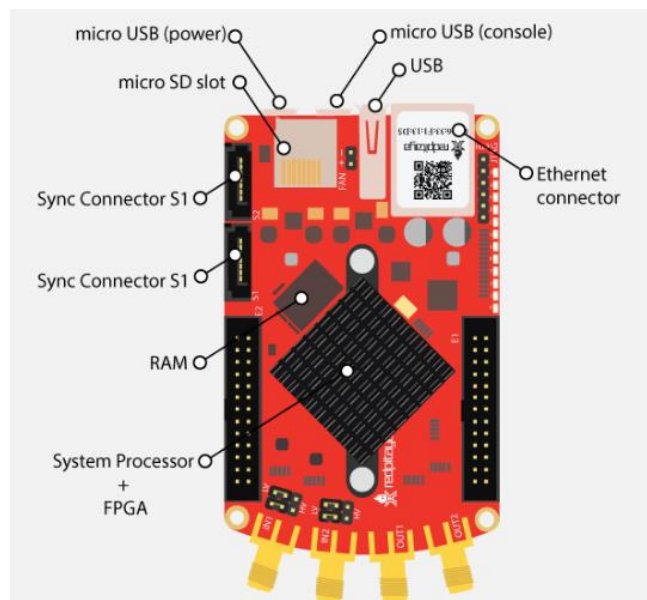
La **Figura 23** muestra el formato de los pulsos en los datos crudos. El primer pulso en la figura es el primero de la adquisición. La línea al inicio da el tiempo en que comenzó el proceso, lo toma del GPS o, en ausencia del GPS, del tiempo de la computadora. Un pulso se almacena cuando la señal supera un umbral dado. Las filas siguientes de tres columnas muestran la cuenta en ADC para cada canal, en la configuración mostrada, se usó únicamente el canal 3, con una línea base de 50 ADC. Las últimas dos líneas del pulso tienen información del tiempo en que se almacenó el pulso (en unidades de bin) y el identificador interno de pulso (un contador).

ANNA es la *suite* de análisis de datos oficial de LAGO. El código principal es "raw.cc", que convierte los datos crudos adquiridos por el código de ACQUA al primer nivel de datos pre-analizados. Los resultados del código pueden ser archivos con la carga integrada temporalmente de los pulsos, archivos de histogramas de la diferencia de tiempos, archivos con el conteo total por segundo, entre otros. La documentación entera de ACQUA y ANNA se puede encontrar en la wiki oficial de LAGO, en wiki.lagoproject.org.

5. Utilización de Red Pitaya para nueva implementación. Red Pitaya es una tarjeta desarrollada por una compañía que lleva el mismo nombre que la tarjeta. Es una compañía que surgió de Instrumentation Technologies, empresa líder en diseñar y desarrollar instrumentos de medición de alto desempeño para aceleradores de partículas. Red Pitaya se presentó como un Kickstarter en septiembre del 2013, recibiendo un alto interés del público, por lo que lograron recaudar el capital necesario para desarrollar el proyecto (Red Pitaya, n/a). Un Kickstarter es una idea de negocios que es lanzada mediante una plataforma de financiamiento para proyectos de todo tipo. El creador del proyecto debe fijar una meta y un plazo de financiamiento y si a las personas visitantes de la plataforma les gusta el proyecto, contribuye con dinero para hacer realidad el proyecto (Kickstarter, n/a).

a. Especificaciones de Hardware. Red Pitaya cuenta con un procesador ARM dual core llamado Cortex A9+. Este es un procesador hardcoded dentro de la FPGA incorporada dentro de la tarjeta. La FPGA que utiliza la Red Pitaya es la Zynq 7010 SoC desarrollada por Xilinx. Esta FPGA se puede comunicar con una memoria RAM DDR3 de 512MB. El procesador Cortex A9+ corre con un sistema operativo de Linux, el cual se debe almacenar en una tarjeta microSD de hasta 32 Gb. Por el modo de funcionamiento se necesita una conexión de red, contando con un puerto Ethernet 1000Base-T. Adicionalmente se le puede conectar un USB ya que cuenta con un puerto USB 2.0 y también con conectores de sincronización de hasta 500 Mbps. La Red Pitaya es alimentada con 5V consumiendo un máximo de 2A (Red Pitaya, n/a).

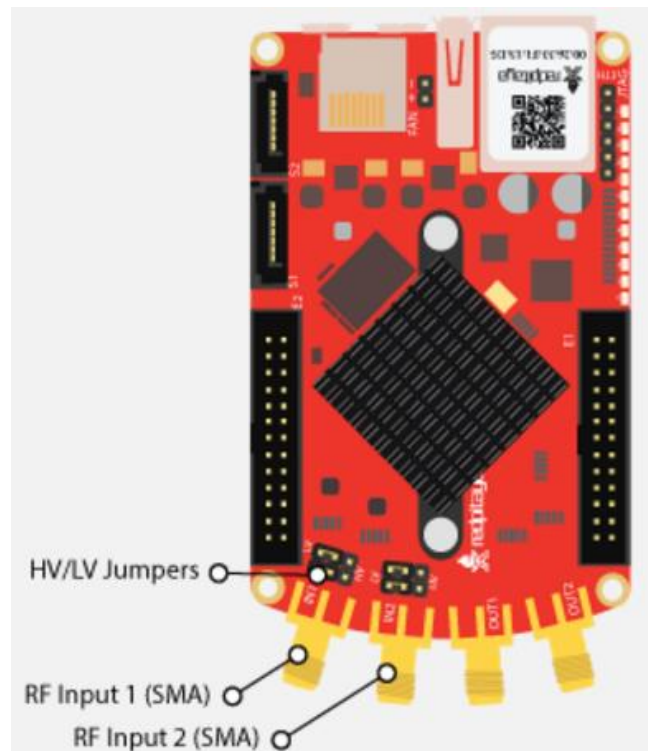
Figura 24. Señalización del hardware básico con el que cuenta una Red Pitaya.



Obtenido de (Red Pitaya, 2016)

La Red Pitaya cuenta con dos entradas analógicas de alta velocidad con puertos SMA, teniendo una frecuencia de muestreo de 125MHz y una resolución de 14 bits, haciéndola una excelente candidata para utilizarse en detectores de radiación Cherenkov. Adicionalmente cuenta con dos salidas analógicas que alcanzan frecuencias de 125MHz teniendo un DAC de 14 bits. El ancho de banda de estos puertos es de 50MHz, teniendo un acople DC con 3dB. Tienen una impedancia de entrada de $1M\Omega/10pF$, debiendo tomar esto en cuenta si se quiere conectar a un PMT. Estos puertos soportan un voltaje de entrada máxima de 30V, teniendo protección a sobre cargas con diodos protectores, con jumpers ubicados detrás de cada puerto, se podrá seleccionar si la entrada será de alto voltaje o de bajo voltaje (Red Pitaya, n/a).

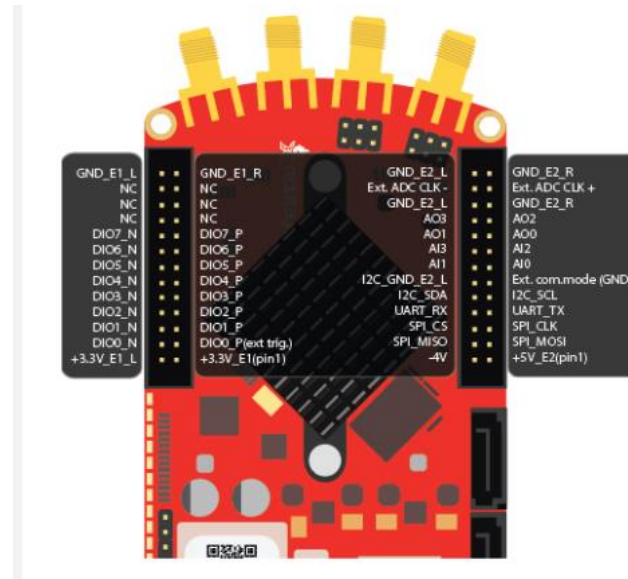
Figura 25. Señalización de las entradas analógicas de alta velocidad con las que cuenta una Red Pitaya.



Obtenida de (Red Pitaya, 2016)

Una de las ventajas que tiene la Red Pitaya sobre las demás FPGA es que tiene entradas y salidas en pines similares a los encontrados en un Arduino o una Raspberry PI. Haciendo posible el diseño de placas secundarias acoplables a este tipo de pines. Dentro de estos pines la Red Pitaya cuenta con cuatro entradas analógicas con frecuencias de muestreo de 100kHz y una resolución de 12 bits, logrando adquirir señales que oscilen de los 0 a 3.5V. Cuenta así mismo con 16 pines digitales que pueden ser configurados como entradas y salidas, admitiendo un voltaje de 3.3V que es tomado como verdadero y 0V que es tomado como falso. Por último, los puertos cuentan con cuatro pines que funcionan como salidas analógicas, produciendo señales que oscilan de 0 a 1.8V, con un máximo de 100kHz y el DAC correspondiente a estos pines cuenta con una resolución de 12 bits. Dentro de estos pines se puede utilizar interfaces de comunicación; incluyendo i²c, SPI y UART (Red Pitaya, n/a).

Figura 26. Señalización de pines con los que cuenta Red Pitaya.



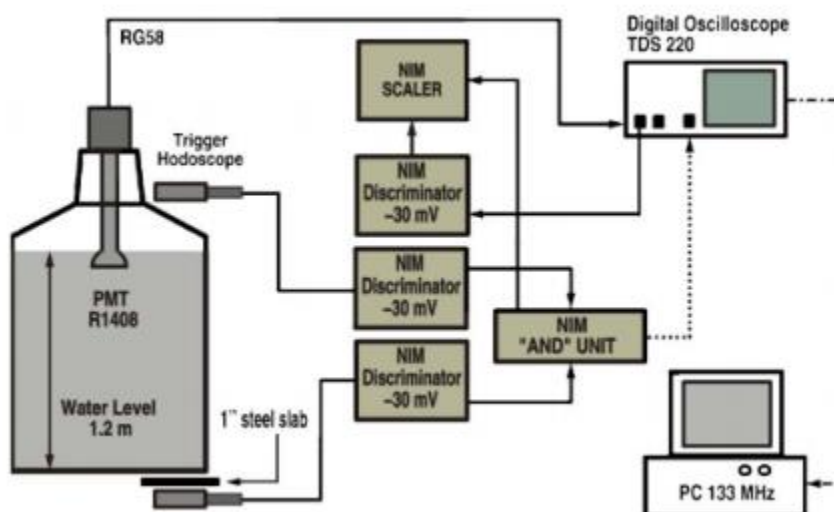
Obtenido de (Red Pitaya, 2016)

b. Lenguajes de programación soportados por Red Pitaya. Red Pitaya puede ser programada en distintos lenguajes de programación de alto nivel, y si se quiere utilizar la FPGA puede ser programada en VHDL o Verilog. Dentro de los lenguajes de alto nivel que maneja Red Pitaya están Python, Matlab, LabView, Scilab y C. Las funciones que configuran los pines tanto entradas como salidas están escritas en C, los demás lenguajes de programación utilizan un protocolo de comunicación interno de Red Pitaya, enviando una cadena de caracteres que corresponde a una función escrita en C para que esta sea ejecutada (Red Pitaya, n/a).

E. Identificación de partículas en detectores de Vavilov-Cherenkov terrestres

1. **Relación entre tiempo de subida y amplitud.** En el trabajo de Salazar y Villaseñor, 2005, se desarrolló un procedimiento experimental para identificar muones verticales y muones arbitrarios. Los muones verticales se seleccionan cuando coinciden dos hodoscopios colocados como en la Figura 27, y muones arbitrarios se escogen cuando la señal superaba un umbral de de 30mV.

Figura 27. Diagrama esquemático del WCD y del sistema de adquisición usado en el trabajo de Salazar y Villaseñor (2005) mostrando el uso de hodoscopio para la identificación de muones verticales



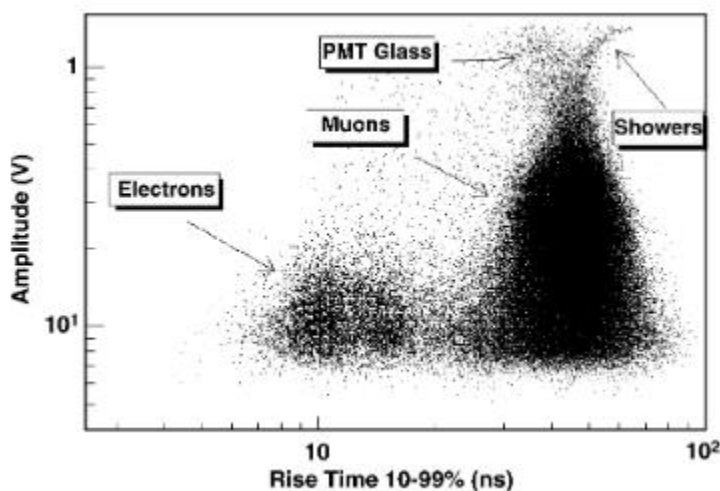
Extraído de (Salazar y Villaseñor, 2005)

Los hodoscopios tienen una pieza centelladora que produce luz y señal (a través de un diodo o un PMT) cuando una partícula cargada lo atraviesa. Eventos identificados como producidos por electrones eran en su mayor medida generados por el decaimiento de muones al chocar con paredes de concreto en el laboratorio. Los electrones producidos en el decaimiento de muones siguen una distribución de Michael, con un valor promedio de energía de 37 MeV. (Allison *et al*, 2005)

La importancia de esta clasificación es que se generó la gráfica mostrada en la **Figura 28**, que muestra la relación entre tiempo de subida y amplitud para las diferentes fuentes

de pulso. Para validar esta interpretación, graficaron los eventos que aparecen cuando el hodoscopio se alinea con el vidrio del PMT. La propiedad más importante a destacar en esta gráfica son las posiciones generales de los eventos de electrones comparadas con las de muones: los eventos de electrones generados por decaimiento tienen tiempos de subida menores y amplitudes iguales o mayores que los de muones. (Salazar y Villaseñor, 2005)

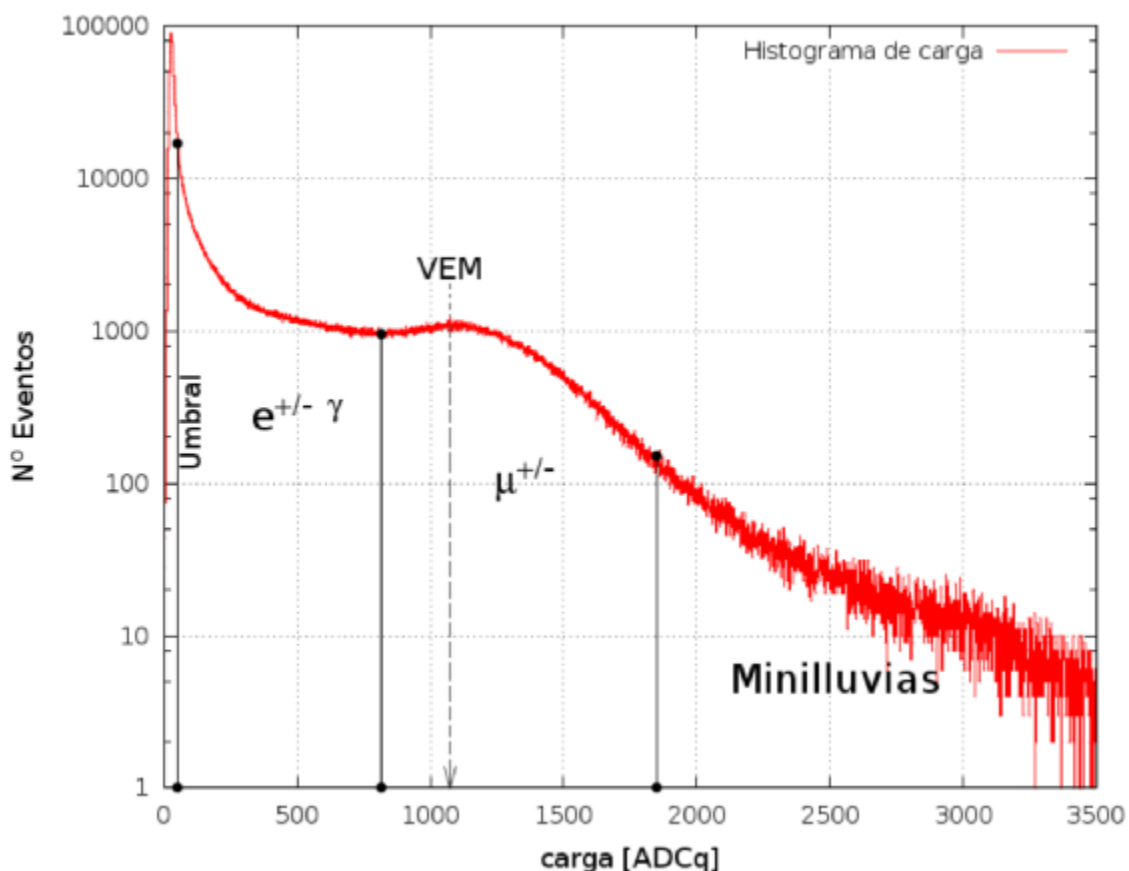
Figura 28. Amplitud respecto al tiempo de subida 10 a 90% para la clasificación de muones arbitrarios



Extraído de (Salazar y Villaseñor, 2005).

2. Modo Histograma en LAGO. Las partículas secundarias que entran al tanque producen radiación de Cherenkov en su recorrido que finalmente se detecta como pulsos medidos en unidades ADC. Una medida de la cantidad de fotones de radiación Cherenkov detectados es la carga integrada ADC_q. Esta se calcula tomando el pulso medido en ADC_q, restando el valor de la línea base, e integrando temporalmente. Un histograma de los eventos ADC_q revela cierta estructura del tipo de partículas que ingresan al tanque y una manera independiente de identificarlas. (Pérez, 2009)

Figura 29. Histograma de carga integrada en ADCq (en el eje horizontal) típico para un WCD, tomado con datos de Nahuelito



Extraído de (Pérez, 2009)

La propiedad más importante de histogramas de carga integrada en ADCq es la presencia de un segundo máximo, por sobre la acumulación de señales que podrían interpretarse como ruido. Esto se muestra en la Figura 29. La ubicación de este máximo corresponde a pulsos generados por el paso de muones verticales. Este valor en ADCq es utilizado para calibrar el detector. El modo histograma presentado en (Pérez, 2009) establece un procedimiento para clasificar eventos a partir de puntos críticos del histograma de ADCq.

Los tres valores críticos que utiliza son el primer máximo em_{peak} , el primer mínimo (llamado punto de transición) y el VEM antes mencionado. El VEM además define un

punto de ADCq mayor, dado por muones que atraviesan el detector en su diagonal. Este valor μ_{max} se calcula mediante la ecuación

$$\mu_{max} = 0.9 \times VEM \times \sqrt{1 + \left(\frac{d}{h}\right)^2}$$

donde d es el diámetro del tanque, h es su altura y el factor 0.9 es para tomar en cuenta la contaminación por eventos no muónicos.

Estos dividen los eventos en tres bandas: la banda electromagnética para eventos con carga integrada menor al del punto de transición, la de componente muónica entre el punto de transición y μ_{max} , y de minilluvias para los de mayor ADCq. La banda electromagnética corresponde a electrones, positrones y fotones de alta energía que por interacción producen electrones y positrones. La componente muónica son los muones provenientes de cascadas de área extensa que atraviesan el tanque por la tapa superior. La banda de minilluvias son partículas secundarias de las cascadas de área extensa cuya diferencia temporal es mayor a la resolución del detector. (Pérez, 2009)

La clasificación de partículas por el modo histograma permite un análisis más detallado de la modulación solar sobre el conteo de rayos cósmicos. Esto se logra estudiando la evolución temporal del conteo de eventos por clasificación para encontrar decrecimientos Forbush. La diferencia entre las evoluciones temporales relativas de cada banda de eventos revela interacciones de las eyecciones de masa coronal interplanetarias con la magnetósfera terrestre. (Pérez, 2009)

F. Simulación Geant4 de detectores Cherenkov en agua

Para realizar las simulaciones de GEANT4 se siguieron las guías de desarrollador de aplicación y se tomaron de referencias otros artículos con simulaciones parecidas, (Nielsen, 2010), (Chen *et al*, 2006), (Calderón, Asorey y Núñez, 2016).

1. Modelos físicos y fotones ópticos. Los fotones ópticos (*opticalphotons*) en la simulación Geant4 son fotones con longitudes de onda mucho mayores que el espacio típico entre átomos, o sea, $\lambda \geq 10\text{nm}$. La producción de fotones ópticos se debe

principalmente al efecto Cherenkov y procesos de centelleos. Las tres interacciones para fotones ópticos son la dispersión elástica (Rayleigh), absorción e interacciones en superficies. La primera usualmente no es importante, ya que la distancia de camino medio es alrededor de 1.7 km para longitudes de onda de radio. La absorción, en cambio, sí es importante, ya que determina el límite inferior de longitud de onda para la transparencia del material. La última interacción se describe en la siguiente sección.

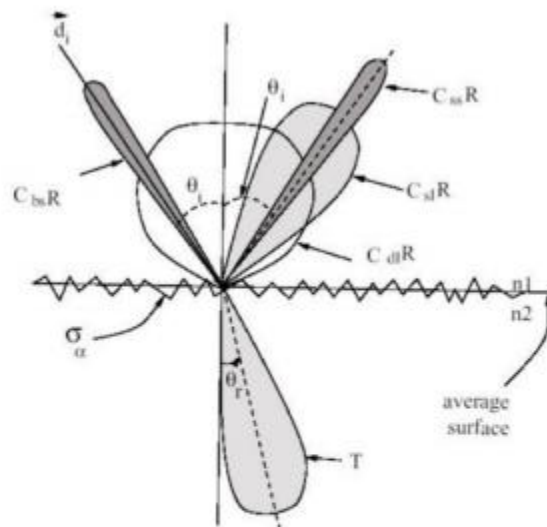
La simulación trabaja el efecto Cherenkov primero calculando el número de fotones por unidad de longitud y de acuerdo al umbral de velocidad y el ángulo genera fotones ópticos por cada paso de la simulación.

2. Efectos en los bordes de volumen. El comportamiento de un fotón cuando arriba al borde de un material depende de la naturaleza de los dos materiales que se unen en el borde. El primer caso es dos materiales dieléctricos, en el que el fotón puede ser transmitido o reflejado. El segundo es cuando pasa de un material dieléctrico a uno que se comporta como metal, entonces puede ser absorbido (y detectado, según la superficie) o reflejado. El tercer caso es cuando arriba a un material para el cual no se ha especificado ninguna propiedad óptica, en ese caso el fotón es absorbido.

Los modelos *UNIFIED* y *GLISUR* son modelos que integran las principales características de modelos ópticos geométricos y físicos para reflexión y transmisión en superficies en diferentes longitudes de onda y aspereza. La diferencia entre los modelos está en cómo dan la distribución de la dirección de la reflexión de fotones.

- *UNIFIED*: modela esta distribución como proporcional a la gaussiana de un parámetro de aspereza (llamado σ_α y medido en radianes).
- *GLISUR*: toma un parámetro de aspereza diferente *polish*, que toma valores de 0 (máxima aspereza) a 1 (mínima aspereza), crea una esfera con radio *polish*, escoge un punto al azar en su superficie y agrega el vector de la normal en ese punto a la dirección de reflexión.

Figura 30: Posibles reflexiones que el modelo UNIFIED calcula para la dirección de reflexión de fotones ópticos incidentes a superficies ásperas. Las sombras ilustran la probabilidad gaussiana de cada reflexión



- $C_{bs}R$: Reflexión por retrodispersión
- $C_{dl}R$: Reflexión Lambertiana interna
- $C_{s,s}R$: Reflexión con la normal de la superficie promedio
- $C_{s,l}R$: Reflexión con la normal de la rugosidad
- θ_i : Ángulo de incidencia
- T : Transmisión
- θ_r : Ángulo de transmisión
- σ_α : Aspereza

Extraído y modificado de (Gumplinger, 2002)

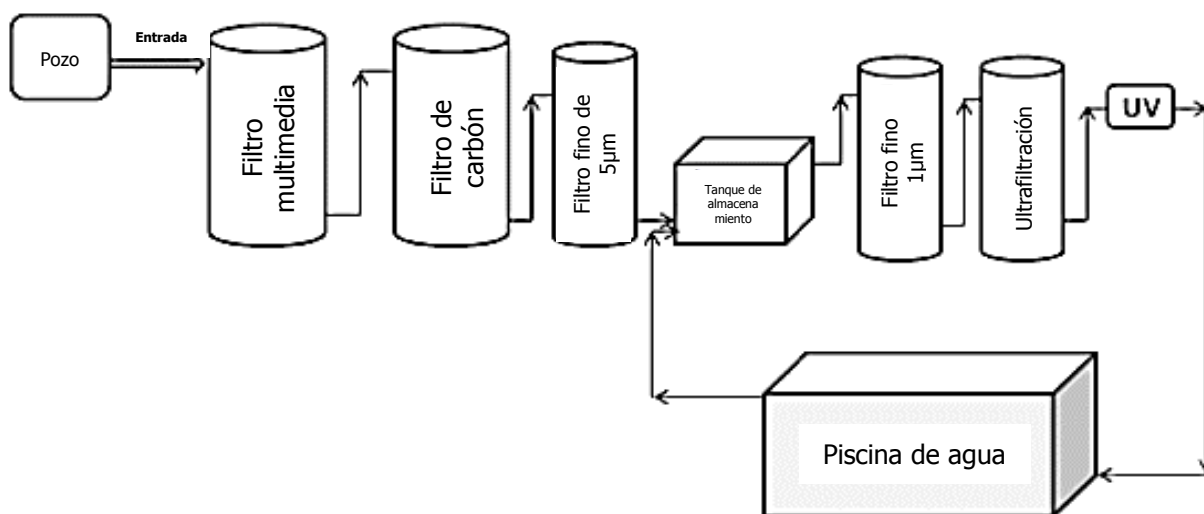
Geant4 incluye la radiación Cherenkov como un proceso físico que puede implementarse desde los archivos de procesos físicos. Calcula las secciones eficaces a partir de la descripción molecular del material refractor.

G. Caracterización del medio en detectores de radiación Vavilov-Cherenkov de agua

En Shangri-La, China se construyó un Detector de Radiación Cherenkov de Agua denominado *Large High-Altitude Air-Shower Observatory* (LHAASO, por sus siglas en inglés). Este detector se encuentra conformado por un sistema de purificación y

recirculación (**Figura 31**) con filtro multimedia, filtro de carbón, filtración fina de $5\mu\text{m}$, tanque de almacenamiento, filtración fina de $1\mu\text{m}$, ultrafiltración de $0.22\mu\text{m}$ y esterilización con lámparas UV que tiene longitud de onda 245nm y 185nm . El agua es administrada y recircula por cada uno de los instrumentos mencionados; para mantener menos del 20% de absorción del largo de atenuación del agua (es decir que el largo de atenuación debe ser más de 20m). Seguidamente, es llevada hacia el tanque principal, en donde son realizadas las mediciones del detector (An *et al*, 2013).

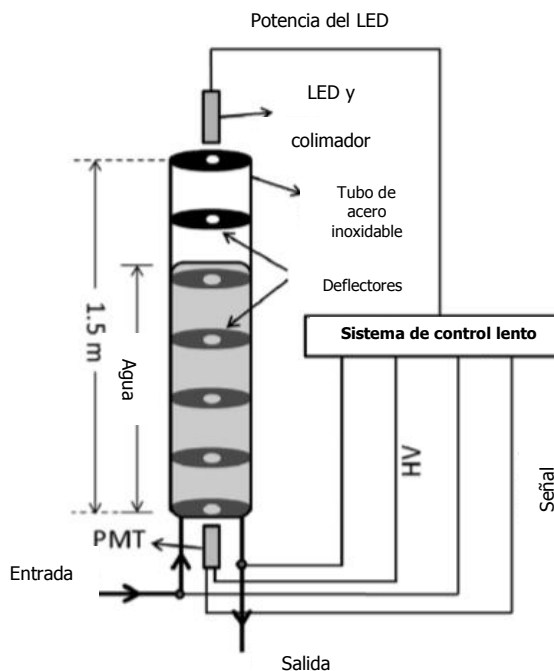
Figura 31. Esquema de purificación y recirculación de agua para el detector de LHAASO.



(An *et al*, 2013)

En este detector se estableció un sistema de control sobre el agua, para el monitoreo de su pureza, en el cual se correlacionó la atenuación de la luz por la profundidad del agua y su degradación. El sistema instalado (**Figura 32**) fue un tubo de una profundidad similar a la del tanque principal, con colimadores que alinean la luz emitida por un LED con un fotomultiplicador (PMT) para la detección de la señal (An *et al*, 2013).

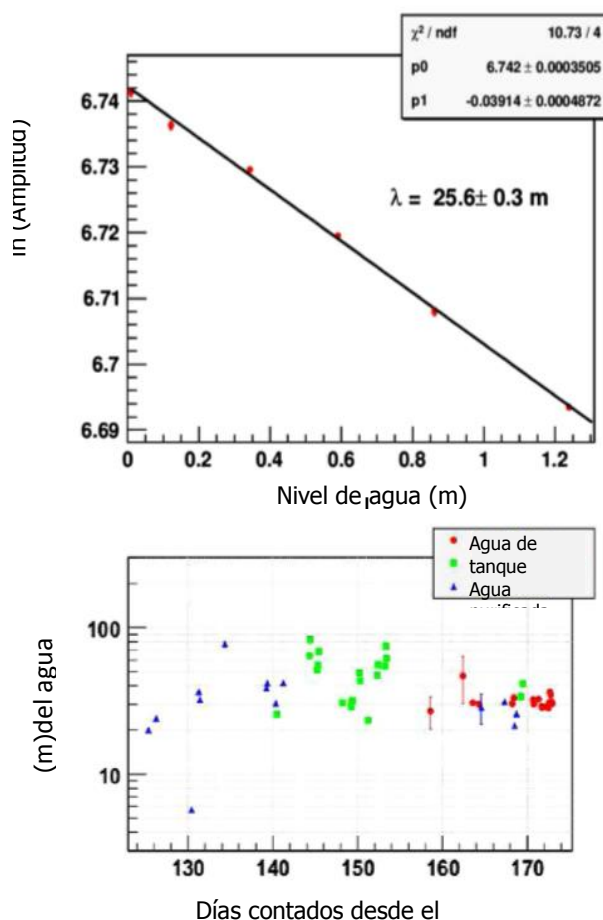
Figura 32. Sistema de control de largo de atenuación de la luz correlacionada con la profundidad de agua en el detector de LHAASO.



(An *et al*, 2013)

El sistema de control fue basado en el hecho que diferentes profundidades de agua, bajo un haz de luz constante, dan como resultado diferentes razones de atenuación de la intensidad de la luz. Por lo que la luz del LED recibida por el PMT (**Figura 32**), difiere en intensidad dependiendo de los niveles de agua utilizados en el sistema. El largo de atenuación del agua fue analizado mediante el ajuste de curva de la relación logarítmica de la amplitud de la señal del PMT y el nivel de agua en el sistema de control (**Figura 33**, Arriba). Finalmente, se definieron los valores de atenuación del agua mediante el uso de la ley de Beer-Lambert con diferentes tipos de agua durante un periodo específico (**Figura 33**, abajo) (An *et al*, 2013).

Figura 33. Arriba) representa la relación logarítmica de la amplitud de la señal del PMT y el nivel de agua. Abajo) es la relación del largo de atenuación del agua y el periodo de medición.



(An *et al*, 2013)

En Cumbayá, Ecuador se encuentra construido un WCD denominado “Panchito”. En el 2015, R. Quishque *et al* publicaron un estudio sobre el agua que es utilizada para las mediciones en el detector. El análisis realizado fue mediante la detección de la atenuación de una luz LED de 480nm, mediante el uso de un fotomultiplicador, en tres tipos de agua: agua municipal, agua municipal con 1.0mL/L de peróxido y agua destilada. El sistema utilizado involucraba un tubo cilíndrico de un metro de largo, un fotomultiplicador y la luz LED mencionada. El monitoreo realizado fue mediante la comparación de la conductividad, índice de refracción, absorbancia, largo de atenuación y costo.

El agua que presentó la calidad óptima fue el agua municipal con 1.0mL/L de peróxido (Quishque *et al*, 2015).

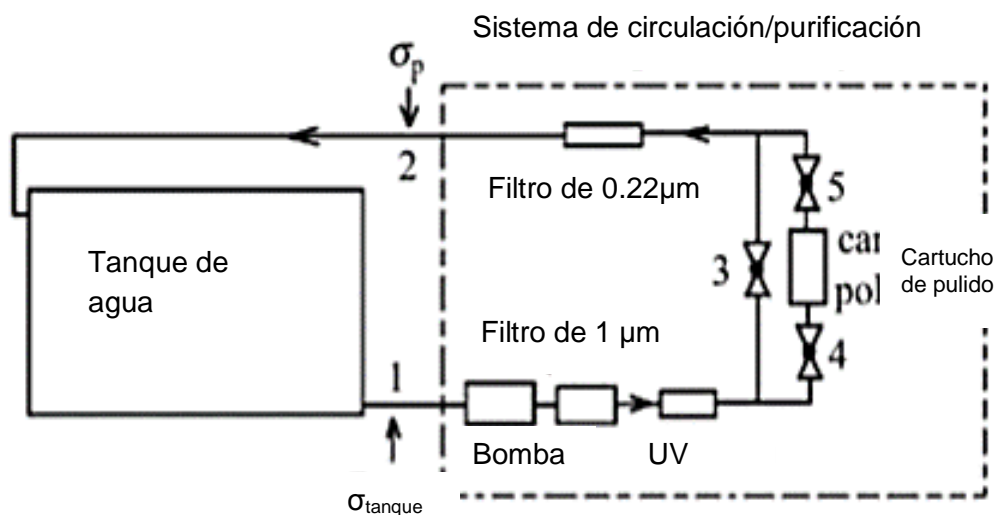
Cuadro 3. Estudio de agua realizado en Cumbayá, Ecuador.

	Agua municipal de Cumbayá	Agua municipal con 1.0mL/L de peróxido	Agua destilada
Conductividad	185 μ S	200 μ S	--
Índice de refracción	1.3330	1.3326	1.3328
Absorbancia	0.0743	0.0506	0.0476
Largo de atenuación (luz azul, 480nm)	13.460 m	19.752 m	21.000 m

(Quishque *et al*, 2015)

En Beijing, China en el Instituto de Altas Energías de Física, Lu Hao-Qi *et al* (2009) publicaron una investigación sobre el modelo de circulación y purificación de agua en detectores de Radiación Cherenkov (**Figura 34**). El modelo toma en cuenta la influencia de un sistema de filtración de contaminantes, velocidad de circulación y resistividad del agua (índice de calidad de agua). El hecho que la calidad de agua disminuye evolutivamente, como resultado de la contaminación del material de contacto, permite hacer el análisis de tiempo correlacionado con la resistividad.

Figura 34. Sistema de circulación y purificación del WCD del Instituto de Altas Energías de Física de Beijing, China.



(Modificado de Hao-Qi *et al*, 2009)

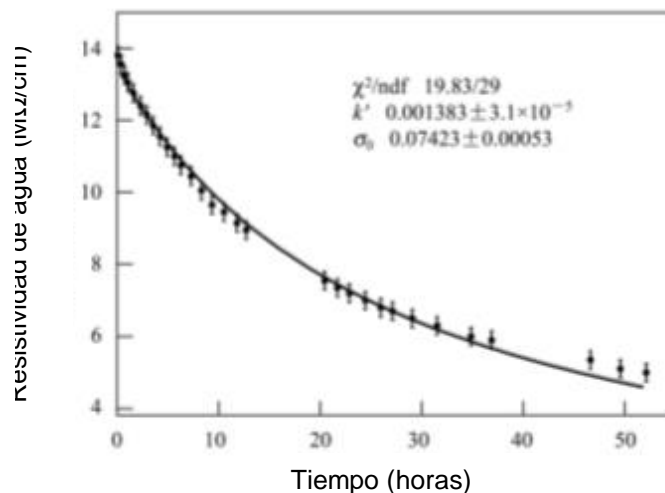
Cuando el sistema de circulación/purificación trabaja conjuntamente la resistividad del agua fue disminuyendo conforme el tiempo, hasta volverse constante. Cuando se realizaron mediciones con únicamente el sistema de circulación encendido, el comportamiento de la correlación de la resistividad R y el tiempo t varían (**Figura 35**) mediante la ecuación (Hao-Oi *et al*, 2009).

$$R_{tanque} = \frac{1}{\sigma_0 + 2k't}$$

(Hao-Oi *et al*, 2009)

Esta expresión muestra la variación de resistividad de agua R respecto al tiempo t . En donde σ_0 es la conductividad inicial del agua y k' ($\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{hora})$) es el aumento de partículas conductoras en el tanque en el sistema de circulación en 1 hora.

Figura 35. Disminución de curva de resistividad del agua respecto el tiempo, después de apagar el sistema de purificación del WCD del Instituto de Altas Energías de Física de Beijing, China.



(Hao-Oi, 2009)

En la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga Colombia se realizaron análisis de calidad de agua de diferentes muestras que podrían ser utilizadas para abastecimiento de los tanques de los WCD; que serían instalados en la ciudad de Bucaramanga y el Páramo de Berlín (Municipio de Tona, Santander). Las muestras utilizadas fueron obtenidas del Páramo de Berlín, con las cuales se realizaron análisis de jarras. Estas consistían en aplicar a una muestra como ensayo de tratabilidad para definir el floculante adecuado y la cantidad necesaria del mismo, para optimizar los resultados en el tratamiento de purificación. Además, se tomó como factor de interés el pH, ya que cualquier coagulante o floculante reaccionan de forma adecuada en medios casi neutros o ligeramente básicos (pH 7-8.5) que son generalmente alcanzados utilizando cal (Núñez *et al*, 2013) (Quitíán, 2011). Los cuatro agentes utilizados como floculantes fueron:

- SA: Sulfato de aluminio tipo A + AQUET (Al₂(SO₄) + bajo porcentaje de óxidos de hierro presentes)
- SB: sulfato de aluminio tipo B + AQUET (Al₂(SO₄) + alto porcentaje de óxidos de hierro presentes)

- SB+Cal: sulfato tipo B + cal (se modifica l pH para aumentar la efectividad del floculante)
- PAC: policloruro de aluminio ($Al_n(OH)_mCl_{3n-m} \cdot H_2O$)

(Núñez *et al*, 2013) (Quitán, 2011)

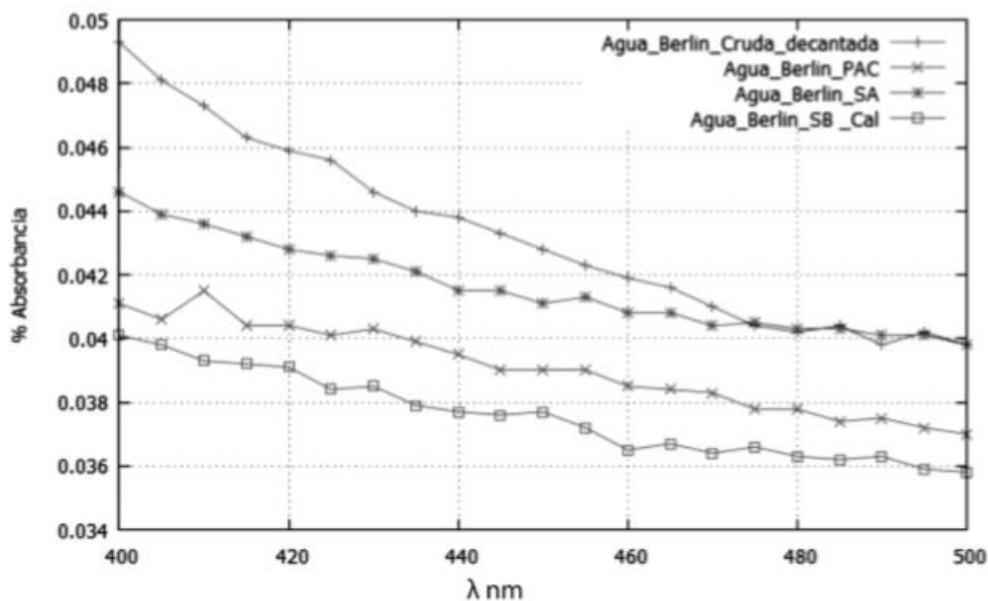
Los diferentes floculantes fueron aplicados a las muestras de agua obtenidas, haciendo comparación respecto a la Turbidez (unidades neferométricas de turbidez, NTU por sus siglas en inglés) con un valor aceptado menor a 2NTU, pH por los tipos floculantes entre 7-8.5, Alcalinidad (mg/L CaCO₃), Color (unidades de platino cobalto PtCo, UPC) con un valor máximo de aceptación de 8 UPC. Los resultados obtenidos de las pruebas se encuentran presentes en el **Cuadro 4** y los porcentajes de absorbancia de las diferentes muestras se encuentran en la **Figura 36**. En ellos es observable que la absorbancia disminuyó con todos los tratamientos, pero significativamente con la aplicación de SB+Cal (Núñez *et al*, 2013) (Quitán, 2011).

Cuadro 4. Resultados obtenidos de las pruebas de jarras realizadas con los diferentes floculantes en las diferentes muestras de agua.

	Agua de Berlín sin decantar	Agua destilada	Agua de Berlín Decantada	Agua de Berlín + SB + AQUET	Agua de Berlín + SB-Cal	Agua de Berlín + SA + AQUET	Agua de Berlín + PAC
Turbidez (NTU)	2.87	0.96	1.65	1.21	1.03	1.16	1.03
pH	7.30	6.96	7.25	7.18	7.13	7.15	7.14
Alcalinidad (mg/L CaCO₃)	32.11	28	32.11	36	28	40	32
Color (PtCo)	15	0	9	0	0	0	0

(Núñez *et al*, 2013) (Quitán, 2011)

Figura 36. Porcentaje de absorbancia de las diferentes muestras de agua del páramo de Berlín y agua decantada sin ningún tratamiento de 400-500 nm.



(Núñez *et al*, 2013)

Un estudio adicional realizado sobre las muestras del Páramo de Berlín fue el de porcentaje de microorganismos presentes, bajo el decreto 1575 del 2007 del Ministerio de Protección Social de la República de Colombia. El cual designa la abundancia de microorganismos de tipo coliforme y *E. coli*, en el **Cuadro 5** se pueden ver los resultados. La presencia de estos microorganismos causa un aumento en la opacidad del agua por lo tanto los fotones de la radiación Cherenkov no son difundidos correctamente dentro del detector, causando pérdida de señal (Núñez *et al*, 2013).

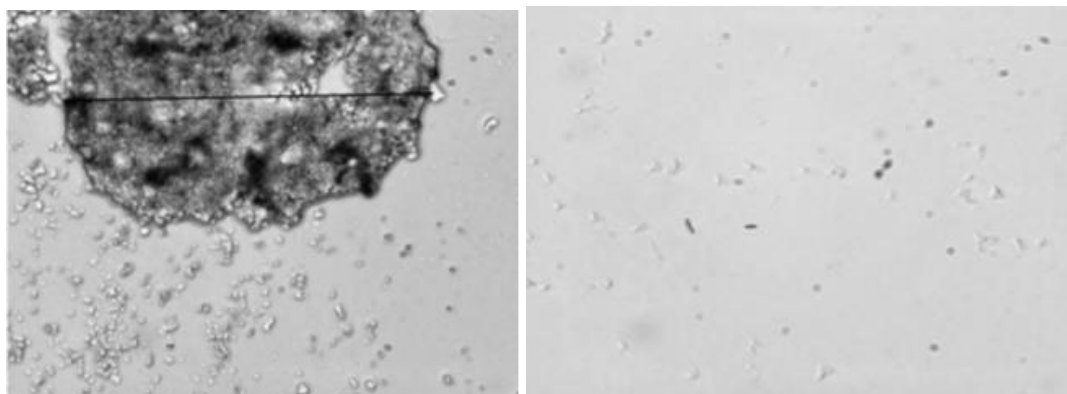
Cuadro 5. Resultados obtenidos de conteo de microorganismos patógenos presentes en muestras de agua del páramo de Berlín sin aplicar ningún tratamiento.

Parámetro	Resultado	Decreto/resolución
Recuento estándar (UFC/ 100mL)	1400	<100
Coliformes totales (UFC/ 100mL)	250	0
<i>E. coli</i>	110	0

(Núñez *et al*, 2013)

En el **Cuadro 5** es observable la presencia de microorganismos debido a que el agua brinda un ambiente propicio para su desarrollo. Razón por la cual se realizó un estudio de agentes desinfectantes sobre las muestras de agua y se realizó la comparación de crecimiento de microorganismos mediante fotografías de alta resolución en un microscopio de visión polarizada y de alto voltaje (**Figura 37**) (Núñez *et al*, 2013).

Figura 37. Izquierda) Fotografía de muestra de Bucaramanga con seis meses sin tratamiento, tamaño de microorganismos de $6.94\mu\text{m}$. Derecha) Fotografía de muestra de agua de Bucaramanga con seis meses con tratamiento desinfectante, tamaño de microorganismos de $0.25\mu\text{m}$.



(Núñez *et al*, 2013)

Con base en los resultados anteriores y posteriormente análisis de dosificaciones óptimas de floculante y desinfectante se formuló un esquema de protocolo de purificación de aguas naturales para detectores Vavilov-Cherenkov de agua:

- Turbidez menor a 1: dosis de floculante de 8 a 10 ppm, valoración de pH. No es necesario tratamiento de filtrado o decantación, mezclar 100 rev/min durante una hora y posteriormente ser mantenidas en reposo para su utilización en el detector WCD (Núñez *et al*, 2013).
- Turbidez en el intervalo de 1 a 5 NTU: medir pH, sino se encuentra en entre 7 y 8 añadir cal hasta alcanzarlo. Agregar entre 15 a 20 ppm de sulfato de aluminio, en intervalos de 5 ppm cada minuto con agitación constante a 100 rev/min por un periodo máximo de una hora; se suspende dosis al observar formación de flóculos o cambio perceptible en apariencia de agua. Continuar

agitando por dos horas para para obtener una mezcla homogénea y facilitar formación de floculos. En un intervalo máximo de 24 horas dejar reposar y consecutivamente retirar sólidos por filtración o por succión de fondo (Núñez *et al*, 2013).

- Turbidez en el intervalo de 5 a 10 NTU: dejar reposar el agua por un periodo máximo de 3 días, en recipiente hermético para deposición de sólidos de mayor peso, suspendidos en la muestra. Los sólidos deberán ser removidos por filtración o por succión de fondo. Consecutivamente se trata de la misma forma que el agua con Turbidez en el intervalo de 1 a 5 NTU (Núñez *et al*, 2013).

Realizado el tratamiento inicial, se procede a aplicar un tratamiento de desinfección. Este consiste en el uso de depósitos nuevos o esterilizados, en los que debe aplicarse 50ppm de cloro granulado al 70%. Esta dosis no debe ser mayor a 100ppm, para evitar aumento en la absorción de fotones por parte del agua (Núñez *et al*, 2013).

La colaboración LAGO-Ecuador (Audelo *et al*, 2013) presentó los resultados obtenidos de los grupos Riobamba y Quito. En esta colaboración se estableció un protocolo de purificación de agua, respecto a las características fisicoquímicas y microbiológicas. Mediante un análisis comparativo de diferentes tratamientos para mejorar la calidad de agua, tomando como base una absorbancia cercana a cero, tomaron la cloración como el más adecuado. El método aplicado fue Cloración por Choque, ya que utiliza una alta concentración de cloro en forma de hipoclorito. Esta puede ser hasta 200 mg de cloro por litro (200ppm) de agua con un tiempo de acción de 12 a 24 horas, antes de utilizarla. Siendo utilizada para el control de olores, prevención de crecimiento de algas, eliminación de hierro y manganeso y destrucción de ácido sulfhídrico (Audelo *et al*, 2013).

En el estudio se definieron las diferentes etapas de consumo del cloro en el sistema: en la primera etapa de acción del cloro se produce la oxidación de sustancias reductoras, principalmente inorgánicas como lo serían Fe^{2+} , Mn^{2+} , H_2S , en este todo el hipoclorito añadido es consumido. Consecuentemente, se comienzan a formar compuestos clorados

(en su mayoría cloraminas) que actúan como cloro residual, que tomaría el carácter desinfectante del sistema. Al reaccionar todo el amoníaco y las aminas orgánicas con el cloro, se inicia la etapa de destrucción de los compuestos clorados formados anteriormente. Al concluirse el punto de ruptura, todo cloro añadido se mantiene libre. Por lo que se considera que desde este punto se ha completado la desinfección y eliminación de materia orgánica oxidable por el cloro. Entonces, el agua toma un valor de cloro residual que es consumido paulatinamente de acuerdo a las condiciones del sistema (Audelo *et al*, 2013).

En el laboratorio de instrumentación de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas, en la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC, 2016) se construyó un Detector de Radiación Vavilov-Cherenkov de agua. En él fue observable, después de dos meses, el crecimiento de microorganismos sobre el Tyvek dentro del tanque de detección (**Figura 38**). El tipo de agua utilizada fue desmineralizada, sin ningún tipo de tratamiento adicional. El tanque presentaba entrada de radiación solar, por lo que promovió el crecimiento de microorganismos foto-dependientes. Este factor fue controlado al utilizar un aislante fotónico de etilvinilacetato alrededor del Tanque.

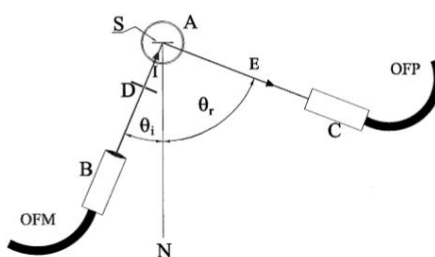
Figura 38. Tanque del detector de Radiación Vavilov-Cherenkov en la Universidad de San Carlos de Guatemala.



(USAC, 2016)

La comisión Nacional de Energía Atómica de Buenos Aires Argentina (Filevich *et al*, 1998), realizó un estudio sobre la reflectividad espectral direccional de Tyvek inmerso en el agua. El estudio se basó en el cambio de las propiedades dispersivas del Tyvek cuando este se encuentra inmerso en agua, desde un punto de vista físico, ignorando el alto factor de atenuación del agua. En los que los principales efectos serían la observación del acortamiento de la longitud de onda cuando la luz atraviesa el medio con un alto índice de refracción. Esto causaría que la superficie parezca ser más rugosa en comparación con el comportamiento del aire. Por lo que se esperaría un diferente patrón de dispersión de la luz, cuando la muestra es iluminada debajo del agua. La estructura de la medición fue con base en la **Figura 39**, con el objetivo de medir la dirección espectral de la intensidad relativa de la luz dispersada por la muestra de Tyvek inmersa en el agua. Los análisis muestrales fueron realizados a longitudes de ondas del espectro visible y ultravioleta. El sistema fue utilizado en combinación de un espectrofotómetro de lámpara de Arco de Xenon, alimentada por una fuente de poder *standard 68806* y combinada con un monocromador modelo 77250 con una rejilla ajustable. Este último fue instalado para limitar el ancho de banda del haz de luz, y así reducir la intensidad de la luz transmitida (Filevich *et al*, 1998).

Figura 39. Arreglo experimental para la medición de Intensidad luminosa reflejada por Tyvek. A: tubo de sílice lleno de agua; OFM: es la fibra óptica del monocromador; OFP: fibra óptica hacia el tubo fotomultiplicador; B y C: adaptadores de fibras ópticas; S: muestra bajo estudio (Tyvek); N: normal hacia la superficie; D: rendija; I y E: haz de luz entrante y saliente, respectivamente; θ_i y θ_r : ángulo de incidencia y ángulo de reflexión.



(Filevich *et al*, 1998)

Sobre la superficie de Tyvek se emitió el haz de luz a un ángulo de incidencia definido a longitudes de onda de 300nm, 360nm, 400m, 560nm, 640nm. Para cada corrida se definía un ángulo de detección del fotomultiplicador. Los ángulos de incidencia utilizados fueron: 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y los ángulos de detección fueron entre -80° y 80°. En cada corrida se varió el ángulo de detección, definiéndolos como ángulos de dispersión. El ángulo que presentaba la intensidad máxima se definió como el ángulo de reflexión. Los ángulos de incidencia, dispersión y de reflexión fueron medidos con un goniómetro, que permitió posicionar el sostenedor de la cabeza de la fibra óptica a diferentes distancias radiales desde el eje de rotación. Se definió el ángulo de incidencia positivo cuando su dirección era en sentido horario respecto a la normal de la superficie; en el caso del ángulo de reflexión era positivo en la dirección antihorario, respecto a la misma normal (Filevich *et al*, 1998).

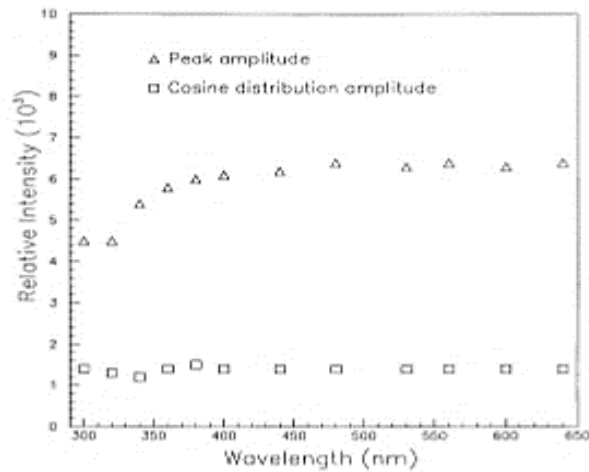
Para la obtención de la calibración de la intensidad relativa en las diferentes longitudes de onda, se realizaron escaneos para captarla intensidad de corriente del fotomultiplicador sin la muestra de Tyvek a 180° del fotomultiplicador (transmisión directa). Los datos de transmisión directa fueron utilizados para la normalización de las mediciones de intensidad a diferentes longitudes de onda. La distribución de la intensidad de luz fue también medida a ángulos cercanos a la transmisión directa, para caracterizar el comportamiento óptico del instrumento. Para el análisis de la intensidad de luz detectada por el fotomultiplicador se definió una relación Gaussiana entre la intensidad relativa y el ángulo de dispersión (**Figura 41**), obteniendo como resultado picos posicionados cercanos al ángulo de reflexión especular $\theta_r = \theta_i$. La función cosenoidal se asumió para ajustar la luz difusa (sugerida por la ley de Lambert), y el término gaussiano para ajustar el pico (el cual causa una contribución especular). Como regla general, todos los parámetros, a excepción del alto del pico (**Figura 40**), mostraron una pequeña dependencia de la longitud de onda. Además, la amplitud de la componente cosenoidal relativa al alto del pico alcanzó su máximo a un ángulo de incidencia de 45° (Filevich *et al*, 1998).

$$\text{Intensidad relativa} = I_r(\theta, \theta_i) = P_1 \exp\left(-\frac{(\theta - P_2)^2}{2P_3^2}\right) + P_4 \cos\left(\theta - \frac{\theta_i}{2}\right)$$

(Filevich *et al*, 1998)

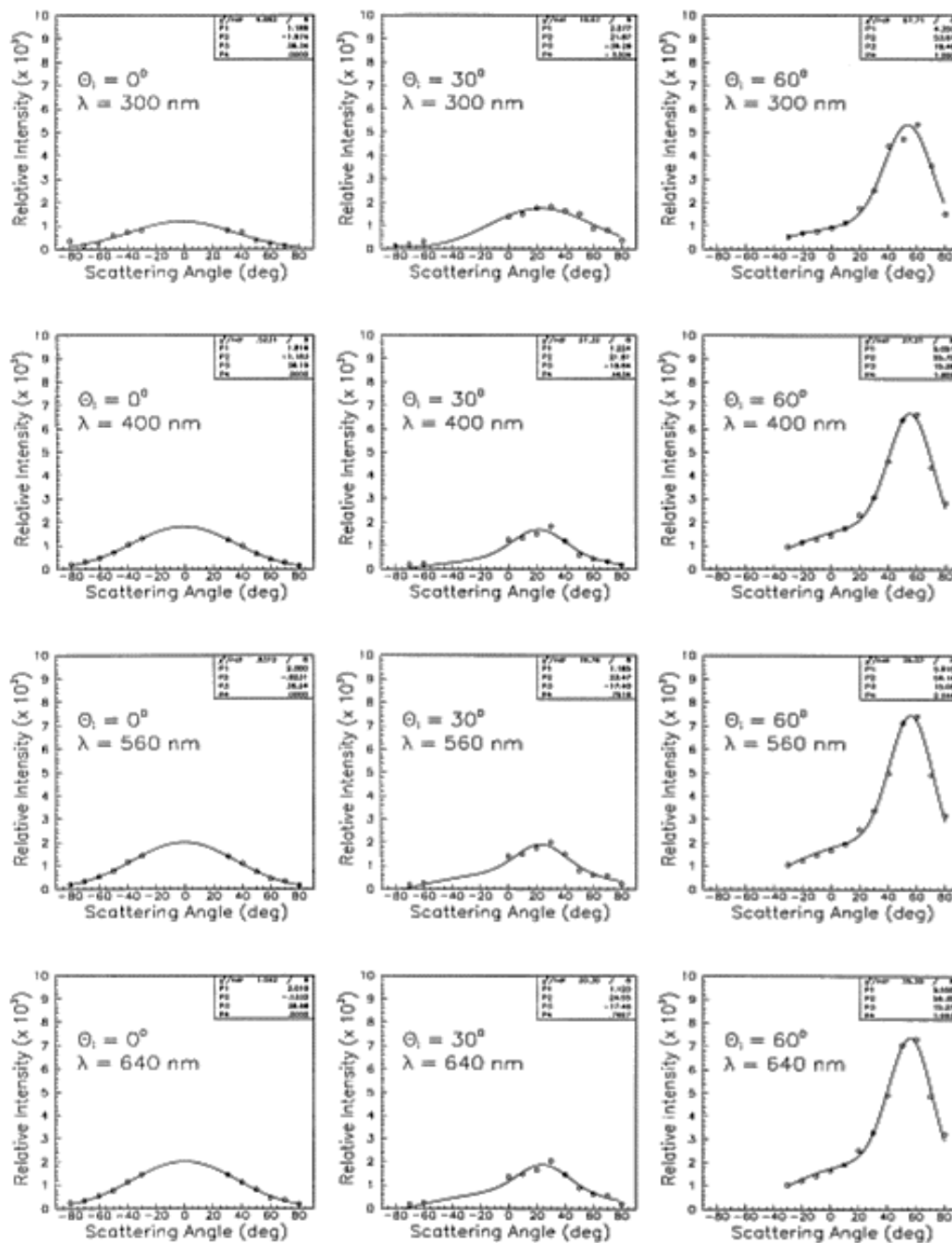
Expresa la relación Gaussiana para la intensidad relativa y el ángulo de dispersión. Para ángulos de incidencia mayores a 15° $P_4 \neq 0$, para ángulos menores de 30° se obtuvieron mejores ajustes de curvas con $P_4 = 0$.

Figura 40. Amplitud de distribución continua y alto de pico vrs longitud de onda de incidencia a 75° .



(Filevich *et al*, 1998)

Figura 41. Ajuste de los datos experimentales de intensidad detectada por fotomultiplicador y ángulo de dispersado utilizando Ecuación 25 para muestra de Tyvek en agua, a 300, 400, 560 y 640nm nm.



(Filevich *et al*, 1998)

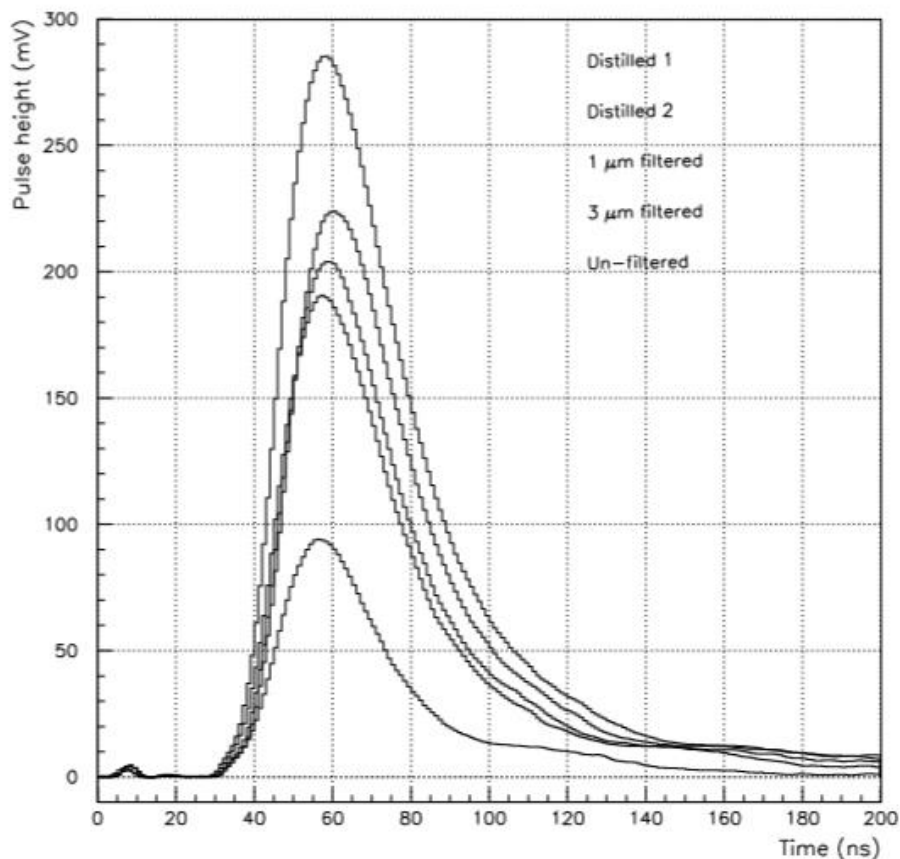
En Fermilab se llevaron a cabo pruebas preliminares de la purificación del agua mediante filtración. Se utilizó un PMT, Hamamatsu R1408 de una semiesfera de 200mm de diámetro, centrado en la superficie del tanque. El interior del tanque fue recubierto con Tyvek y llenado completamente con diferentes tipos de agua: agua destilada, agua no filtrada del abastecimiento municipal de Fermilab, agua del abastecimiento municipal filtrada con un filtro de $3\mu\text{m}$ y agua del abastecimiento municipal filtrada con un filtro de $1\mu\text{m}$. El paso de los muones en el tanque fue definido utilizando un telescopio de contador de centello (*scintillation counter telescope*⁹, en inglés). En la **Figura 42** se pueden ver los promedios de tiempo versus la amplitud para sets del paso de 100 muones para cada tipo de agua. La repetitividad fue revisada en cada una de las corridas al llenar el tanque y volviendo a llenarlo con los diferentes tipos de agua. Los resultados obtenidos de las corridas realizadas con agua filtrada mostraron ser reproducibles, pero algunas en agua destilada brindada por Fermilab dieron mejores resultados que otras. Lo cual permitió inferir la presencia de contaminantes en algunos contenedores de agua destilada (**Figura 42**, destilada 1 y 2) (Etchegoyen, *et al*, 1996).

Pruebas realizadas posteriormente, en el prototipo del tanque de Fermilab, mostraron que en el tanque el número de fotoelectrones se triplicaban cuando el agua era desionizada y filtrada por un filtro de $1\mu\text{m}$. Este aumento no pretendió ser inconsistente con los resultados obtenidos en la **Figura 42**, ya que la extrapolación a un tanque de gran tamaño se esperará una mayor dependencia en la claridad del agua, ya que aumenta el largo de la trayectoria del fotón promedio Vavilov-Cherenkov. En el laboratorio Tandar el prototipo de tanque fue tratada con ósmosis inversa y el agua en el tanque prototipo de AGASA utilizó agua municipal sin tratar. Todos los prototipos presentaron un rendimiento aceptable, definidos como 50 fotoelectrones por muon vertical, permitiendo inferir que la pureza del agua no presentaba un problema crítico. La estabilidad del agua es crítica para la operación del tanque a largo plazo del experimento. Hay dos fuentes de contaminación a considerar: actividad química y actividad biológica. La actividad química confiere a la posible oxidación de materiales metálicos en el tanque, que es

⁹ Consiste de dos centelladores con una región posicional y angular con respecto al haz y al contador, que miden la energía total de la partícula que pasa a través del centellador.

posible evitar utilizando plástico. La actividad biológica puede ser suprimida controlando las impurezas en el agua, añadiendo biosidas al agua, esterilizando el agua antes de la instalación en los tanques sellados o combinando ambas técnicas (Etchegoyen, *et al*, 1996).

Figura 42. Resultados de filtración de agua en tanque detector de Femilab.



(Etchegoyen, *et al*, 1996)

En la **Figura 43**, los perfiles de tiempo/amplitud son el promedio de 100 penetraciones verticales de eventos de muones tomados en un osciloscopio digital de 400 megas de muestras por segundo (MSPS). En la gráfica se removieron los eventos de las lluvias múltiples de muones. Los pulsos son, de mayor a menor amplitud: agua destilada 1, agua destilada 2, agua municipal filtrada con un $1\ \mu\text{m}$, agua municipal filtrada con un filtro de $3\ \mu\text{m}$ y agua municipal sin filtrar.

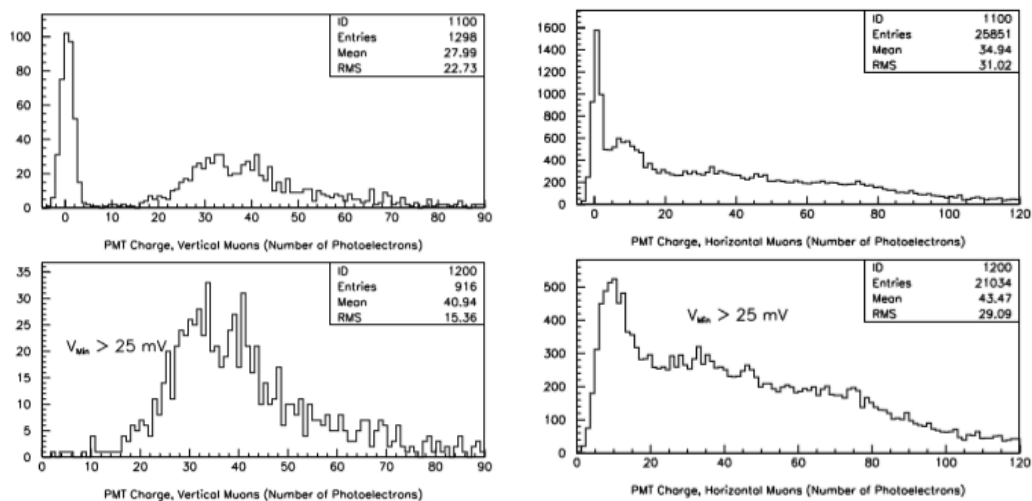
N. Chávez, M. Medina y L. Villaseñor (2000) propusieron el análisis del espectro de carga debido a la radiación Vavilov-Cherenkov producida mediante la interacción de rayos cósmicos con el vidrio del PMT. La corriente oscura¹⁰ (*Dark current* en inglés) de cualquier PMT contiene la señal de multi-fotoelectrones causados por la interacción de los muones de los rayos cósmicos con el vidrio (ventana de entrada del PMT). La radiación Vavilov-Cherenkov producida en la ventana de entrada es convertida a fotoelectrones en el fotocátodo, como cualquier otra señal con una eficiencia cuántica alta, ya que la radiación es predominantemente UV y azul en la región del espectro visible. Este mecanismo es común en todos los PMT y la razón de este ruido aumenta con el área de superficie del PMT. Del mismo modo, el número de fotoelectrones por interacción aumenta a medida que la transmisión del vidrio aumenta en la región UV. Razón por la cual, es importante tener un conocer el espectro de carga debido a la interacción de los rayos cósmicos con el vidrio del PMT. La investigación experimental fue realizada con el PMT ETL 9354, ya que es uno de los PMT utilizados en los tanques del Proyecto Auger. Se cubrió el PMT completamente con plástico negro y fue colocado junto a dos centelladores de conteo. La señal de los contadores fue discriminada y alimentada en coincidencia con la unidad NIM. El seguimiento de los eventos por el osciloscopio fue adquirido por una computadora y analizada en línea para obtener la carga y amplitud de la señal del PMT, la adquisición de datos escritos en LabView.

Se hicieron pruebas con el PMT colocado vertical y horizontalmente entre los centelladores. En esta prueba fueron observados dos casos. En la **Figura 43** (izquierda y derecha, arriba) son observables dos picos, los cuales no corresponden al muon detectado por los centelladores; esto es explicado porque posiblemente no haya pasado la partícula en el PMT o haya cruzado por una región pasiva. En la **Figura 43** (izquierda y derecha, abajo) sí es observable el paso de un muon que interacciona con la ventana de entrada del PMT, y produce la distribución de los fotoelectrones observados en la Figura. Finalmente, se concluyó que la cantidad de fotoelectrones liberados en el vidrio del

¹⁰ Flujo de corriente pequeña en el tubo del fotomultiplicador, aun cuando se encuentra operando en completa oscuridad (Hamamatsu Photonics, 2013)

fotomultiplicador por los muones atravesándolo era de 43, tanto para muones horizontales y verticales (Chávez, Medina y Villaseñor, 2000).

Figura 43. Distribución de carga de señal del PMT ETL 9354 producida por muones atravesando la ventana de entrada del PMT. Izquierda) detección vertical. Derecha) detección horizontal.



(Chávez, Medina y Villaseñor, 2000)

VI. FUNDAMENTOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y APRENDIZAJE DE MÁQUINA

A. Aprendizaje supervisado

La clasificación de los eventos registrados por el WCD se realizará mediante la implementación y entrenamiento de un Clasificador Bayesiano, mediante el algoritmo de Naïve Bayes complementado con técnicas de Alisamiento para mejores resultados. El acercamiento en una clasificación Bayesiana es que se asume la independencia condicional entre eventos (de ahí su forma *naïve*), permitiendo calcular probabilidades de inferencia para elementos específicos.

La probabilidad para una categoría C dado un conjunto de atributos está dada por la siguiente expresión: (Russell, S. J., Norvig, P., 2010: 808)

$$\vec{P}(C | x_1, \dots, x_n) = \alpha * \vec{P}(C) \prod_i^n \vec{P}(x_i | C)$$

En el caso de Naïve Bayes, el término de la multiplicatoria con Alisamiento de Laplace se calcula de la siguiente manera: (Thalman, N.; Yuan, Q.: 2012)

$$\vec{P}(x | C) = \frac{\mathcal{L} + \text{count}(x, C)}{\mathcal{L}|V| + \text{count}(C)}$$

Donde \mathcal{L} es el valor de Alisamiento, $\text{count}(x, C)$ es la cantidad de veces que x aparece en el diccionario de la categoría C y $|V|$ es el tamaño del vocabulario (todas las palabras). El alisamiento es algo sumamente necesario para el correcto funcionamiento del clasificador, dado le permite responder relativamente bien a información que no tenía clasificada previamente.

El clasificador Bayesiano se entrena de forma Supervisada, realizado distintas iteraciones hasta obtener un valor \mathcal{L} de alisamiento que minimice el error de los datos. Para realizar dicho entrenamiento se requiere obtener o generar un Lote de datos de entrenamiento que contenga información de varios eventos, los cuales deben estar clasificados (etiquetados) con base en el tipo de partícula que representan (muones, etc).

(Mitchell, T., 2015) Para obtener/generar dicho lote se consideraron las siguientes opciones:

- Generación Manual de los Datos, etiquetados manualmente junto al resto del equipo.
- Interpolación de Datos de otros miembros de la colaboración (Colombia) de X ($x < 25$) datos a uno con 25 valores, etiquetados manualmente junto el resto del equipo.
- Combinación de 1) y 2)

De dicho lote de datos se realiza una partición en tres subconjuntos de datos: Datos de Entrenamiento (80%), Datos de Validación (10%), Datos de Prueba (10%). Dicha proporción es la recomendada para este tipo de algoritmos (MIT, 2015). Los datos de Entrenamiento serán los que se carguen inicialmente, para luego probar nuestro rendimiento con los datos de Validación. Esto se realiza iterativamente hasta obtener un resultado óptimo o se alcance el límite de iteraciones. Finalmente se utilizan los datos de Prueba para obtener el rendimiento final del clasificador.

Es sumamente importante estos datos de Prueba no sean incluidos en ninguno de los otros subconjuntos para evitar errores. Otro aspecto importante a considerar es que la totalidad de datos en el Lote deben reflejar la proporción verdadera de dichas partículas en nuestro universo, proporción que debe permanecer en los subconjuntos generados. Esto ya que el modelo responderá con más precisión a eventos que sigan esa proporción establecida en el entrenamiento. (Russell, S. J., Norvig, P., 2010)

B. Aprendizaje no supervisado

Por lo general, los datos que se obtienen en distintos ámbitos científicos no poseen toda la información necesaria para calcular adecuadamente su probabilidad y definir un modelo. Las variables de la data pueden dividirse en variables “ocultas” (aquellas propias del objeto de estudio, pero no disponibles en un dato específico) y variables “visibles” (aquellas que sí conocemos). A las situaciones en las que no todas las variables son

visibles en un conjunto de datos se les denomina Modelos de Variables Latentes; procesos importantes para la descripción del modelo pero que no se pueden medir directamente. Para éste tipo de datos se asume cumplen con el supuesto de Ausencia Aleatoria (*missing at random assumption*), la cual indica que los datos dependen solamente de los estados visibles (y no existe alguna condición que afecte de forma no aleatoria el modelo). Ello permite simplificar el proceso de aprendizaje pudiendo utilizar la probabilidad marginal para encontrar los parámetros optimizando la función:

$$p(v | \theta) = \sum_h p(v, h | \theta)$$

Con respecto a los parámetros θ . Donde v corresponde a las variables visibles (los datos con los que se cuentan) y h corresponde a los estados de las variables ocultas.

Para maximizar esta probabilidad marginal se suele utilizar el algoritmo de Maximización de la Esperanza (*Expectancy Maximization*). El algoritmo EM es una forma iterativa y de propósito general para maximizar la probabilidad (esperanza) de un modelo de datos con variables ocultas o escondidas. Su implementación es sencilla y logra buenos resultados en pocas iteraciones. (Barber, David, 2012)

Formalmente, se puede obtener la siguiente cota para probabilidad marginal de un dato de entrenamiento individual v :

$$\log p(v | \theta) \geq -\log q(h | v) + \log p(v, h | \theta)$$

En donde $p(v, h | \theta)$ es el modelo paramétrico incluyendo las variables ocultas h , y $q(h | v)$ es la distribución “variacional” de la probabilidad de que v pertenezca a h . El término variacional se refiere al hecho que la distribución mencionada es un parámetro de un problema de optimización. Sumando para todos los datos de entrenamiento se obtiene:

$$\log p(\mathbf{V} | \theta) \geq -\sum_{n=1}^N \log q(h^n | v^n) + \sum_{n=1}^N \log p(v^n, h^n | \theta)$$

De ello deriva el algoritmo EM, que consiste de dos pasos: El **paso-E** encuentra las distribuciones $q(h^n | v^n)$ que maximizan (5) con parámetros θ fijo y luego el **paso-M**

encuentra los parámetros θ que maximizan (5) con distribuciones $q(h^n|v^n)$ fijas. Dichos pasos se realizan de forma alternada e iterativa. Nótese la similitud de la segunda sumatoria con $\sum_h p(v, h | \theta) \sum_h p(v, h | \theta)$; ello se debe a que se puede demostrar que basta con maximizar el segundo término de la ecuación (5) durante el paso-M dado que q no depende del nuevo parámetro θ obtenido. Además, la ecuación (5) resulta ser una cota exacta cuando $q(h^n|v^n) = p(v^n, h^n | \theta)$, momento en que se obtienen los parámetros óptimos. Este algoritmo garantiza un incremento en la esperanza con cada iteración. (Barber, David, 2012).

Otra manera de modelar datos de forma no supervisada es utilizar Modelos Mixtos (Mezclas). Un Modelo Mixto es un conjunto de modelos componentes que se combinan para producir un modelo más detallado:

$$p(v) = \sum_{h=1}^H p(v | h) * p(h)$$

Donde h corresponde esta vez a los índices de cada modelo componente $p(v | h)$ junto su peso o ponderación $p(h)$. Los Modelos Mixtos destacan en clasificar datos en conjuntos (*clusters*), en donde h corresponde al índice del conjunto. Además, considerando h como una variable oculta los Modelos Mixtos pueden entrenarse utilizando el algoritmo EM. (Barber, David, 2012)

Los modelos Gaussianos son componentes convenientes a la hora de entrenar modelos mixtos, dado representan de forma continua probabilidades de masa ayudando a la interpretación intuitiva del modelo. Existen librerías de funciones especiales para trabajar con modelos mixtos, como la que facilita *scikit-learn* para Python (`sklearn.cluster.Mixture`). Una distribución Gaussiana D dimensional para una variable continua x es:

$$p(x | \mathbf{m}, \mathbf{S}) = \frac{1}{\sqrt{\det(2\pi\mathbf{S})}} e^{-\frac{1}{2}(x-\mathbf{m})^T * \mathbf{S}^{-1} * (x-\mathbf{m})}$$

En donde \mathbf{m} es la media y \mathbf{S} es la matriz de covarianza de tamaño DxD. Por lo que un Modelo Mixto de Gaussianos (GMM) tendría la siguiente forma:

$$p(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^H p(\mathbf{x} | \mathbf{m}_i, \mathbf{S}_i) * p(i)$$

La clasificación de los datos respecto al modelo mixto resulta de aplicar las consideraciones anteriores al algoritmo EM, resultando en un conjunto de parámetros $\theta = \{\mathbf{m}_i, \mathbf{S}_i, p(i)\}$ para $i = 1, \dots, H$. Estos parámetros indican la media y covarianza de las H distribuciones Gaussianas que representan el modelo mixto. Un dato analizado con el modelo tendrá un porcentaje de pertenencia a cada uno de los conjuntos resultantes, clasificándolo como perteneciente al conjunto con la máxima probabilidad de pertenencia (argmax). Se puede notar que éste método brinda una clasificación “suave” respecto al modelo, otorgando un porcentaje de pertenencia a cada conjunto en vez de elegir una única categoría. (Barber, David, 2012)

Considérese ahora la siguiente Mezcla de K distribuciones isotrópicas Gaussianas \mathcal{N} , igualando sus covarianzas a la identidad $\sigma^2 \mathbf{I}$:

$$p(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^K \mathcal{N}(\mathbf{x} | \mathbf{m}_i, \sigma^2 \mathbf{I}) * p(i)$$

Restringiendo el modelo a que todas las componentes tengan la misma matriz de covarianza la función de distribución de pertenencia se vuelve determinística (el dato n pertenece al conjunto i ssi. \mathbf{m}_i es el más cercano al valor x^n de ese dato). Ahora los pasos E y M se realizan obteniendo el promedio de los puntos cercanos a \mathbf{m}_i . Éstas restricciones aplicadas al GMM lo reducen al algoritmo *k-means*, que a pesar de su simpleza converge rápidamente y brinda agrupamientos adecuados dado se tuvo una inicialización adecuada. El algoritmo *k-means* se utiliza usualmente como forma de compresión de datos, mediante cuantificación de vectores (*vector quantization*); reemplazando cada dato x^n con el índice de su conjunto asociado. Es también utilizado para inicializar las condiciones iniciales de otros algoritmos de modelos mixtos, como el GMM. (Barber, David, 2012)

El algoritmo *k-means* construye k particiones del conjunto de datos minimizando la distancia entre cada elemento con el centro de cada uno de los k centros de conjuntos, de la forma:

$$\operatorname{argmin}_S \left[\sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} \|x_j - c_j\|^2 \right]$$

Donde S es el conjunto de grupos a clasificar, k es la cantidad de conjuntos a clasificar, x es cada dato y c es el centro correspondiente a cada S . De esta manera se encuentra iterativamente el centro que minimiza el error o distancia entre datos, reflejando la mejor tendencia de los mismos. (Barber, David, 2006) Existen diversas implementaciones del algoritmo, como la que facilita la librería *scikit-learn* para Python (`sklearn.cluster.KMeans`).

VII. PMI Y LAS BUENAS PRÁCTICAS DE GESTIÓN DE PROYECTOS

A. Project Management Institute

El Project Management Institute, institución creada en 1969, es una asociación sin fines de lucro que se dedica al progreso y desarrollo de la profesión de gestión de proyectos. El PMI está representado en más de 170 países con más de 500,000 miembros y certificados en todo el mundo. (PMI Guatemala Chapter, 2016)

La organización es reconocida por sus estándares de gestión de proyectos y aporte a proyectos académicos, de mercadeo y también proyectos de desarrollo de oportunidades profesionales. El PMI ha trabajado en mejorar el desempeño en distintos tipos de proyectos para distintos tipos de industrias. La institución ha creado recursos y herramientas, así como cursos para transmitir los estándares de gestión de proyectos.

La misión del PMI es desarrollar la práctica, ciencia y profesión de la gestión de proyectos en el mundo, de una forma consciente y proactiva. Su visión es un mundo en el que las organizaciones reconocen, valoran y utilizan la gestión de proyectos y atribuyen el éxito a las buenas prácticas de dirección de proyectos. (PMI, 2012: 3)

B. Definición de proyecto

Un proyecto, según el Project Management Institute (PMI), se define como un esfuerzo temporal que se lleva a cabo con el fin de crear un producto, servicio, o resultado único. Esto indica que los proyectos tienen un inicio y un final definidos por el alcance de objetivos. Las cualidades del proyecto por lo general no aplican al resultado final del mismo. Los proyectos pueden tener impactos en distintos ámbitos que pueden perdurar más que el propio proyecto. La dirección de proyectos es la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto, para cumplir con los requisitos del mismo. La administración de un proyecto generalmente incluye, pero no se limita a:

- Identificación de requerimientos.

- Preparar y mantener las comunicaciones entre los interesados del proyecto.
- Balancear las restricciones del proyecto como el alcance, la calidad, el presupuesto, el cronograma, los recursos y los riesgos.

La relación entre estos factores es tal que, si un factor sufre un cambio, es probable que algún otro también sea alterado. Es el deber de un gestor de proyectos trabajar con el equipo del proyecto para lograr el trabajo requerido. Un gestor de proyectos efectivo balancea habilidades interpersonales y conceptuales para analizar situaciones y poder interactuar de forma correcta (PMI, 2013: 3).

C. Ciclos de vida en proyectos

El ciclo de vida de un proyecto es la serie de fases por las que atraviesa un proyecto desde su inicio hasta su cierre. Las fases son generalmente secuenciales. Las fases se pueden dividir tomando como referencias los objetivos funcionales, resultados intermedios, hitos, o disponibilidad de recursos. El ciclo de vida proporciona el marco de referencia básico para la dirección del proyecto, independientemente del trabajo específico involucrado. El enfoque del ciclo de vida puede basarse en enfoques predictivos, o adaptativos. Los ciclos de vida predictivos definen los entregables desde el comienzo del proyecto y los cambios realizados en el alcance son cuidadosamente gestionados. Los ciclos de vida adaptativos tienen múltiples iteraciones y distintos alcances para cada iteración, definidos al inicio de las mismas.

La estructura genérica de un ciclo de vida es: inicio de proyecto, organización y preparación, ejecución del trabajo y cierre de proyecto. Los proyectos pueden ser divididos en cualquier número de fases. Las fases se determinan por conjuntos de actividades relacionados de manera lógica, culminando con la entrega de uno o más entregables. (PMI, 2013: 38)

1. Ciclos de vida predictivos. Son los ciclos que van totalmente orientados a un plan, son aquellos en los cuales el alcance del proyecto, el tiempo y costo requeridos para

lograr dicho alcance, se determinan lo antes posible en el ciclo de vida del proyecto. Generalmente, se opta por estos ciclos cuando el producto a entregar se comprende bien, o existe alguna base sobre la cual se pueda trabajar (PMI, 2013: 44),

2. Ciclos de vida iterativos. Los ciclos de vida iterativos o incrementales son en los cuales, dentro de las fases del proyecto, se repiten de manera intencionada una o más actividades del proyecto a medida que aumenta el entendimiento del producto por parte del equipo del proyecto. Las iteraciones desarrollan el producto a través de una serie de ciclos repetidos, mientras que los incrementos van añadiendo sucesivamente funcionalidad al producto. Durante cada iteración se pueden realizar distintos procesos de la dirección de proyectos. Se opta por este tipo de ciclos de vida cuando una organización necesita gestionar objetivos y alcances cambiantes, para educir la complejidad de un proyecto o cuando la entrega parcial de un producto beneficia o genera valor para los interesados sin afectar de forma negativa al entregable final. Los proyectos grandes y complejos se ejecutan a menudo de modo iterativo para reducir el riesgo, al permitir que el equipo incorpore retroalimentación y lecciones aprendidas entre iteraciones (PMI, 2013: 45).

3. Ciclos de vida adaptativos. Los ciclos de vida adaptativos se denominan como ágiles u orientados al cambio ya que pretenden responder a niveles altos de cambio y a la participación continua de los interesados. Los métodos adaptativos también son iterativos, pero las iteraciones son muy rápidas y de duración y costo fijos. Estos proyectos generalmente ejecutan varios procesos de dirección de proyectos en cada iteración, aunque las iteraciones iniciales pueden concentrarse más en las actividades de planificación. Al comienzo de una iteración, el equipo determina cuantos de los elementos de alta prioridad de la lista de pendientes se pueden entregar dentro de la iteración. Generalmente, se opta por los métodos adaptativos en entornos que cambian rápidamente, cuando los requisitos y el alcance son difíciles de definir con antelación y cuando es posible definir pequeñas mejoras graduales que aportan valor a los interesados (PMI, 2013: 46).

D. Procesos de la dirección de proyectos

Las funciones de un gerente de proyecto incluyen el uso de las buenas prácticas de gestión de proyectos para aprovechar los recursos de forma eficiente y lograr lo delimitado por el alcance del proyecto en el tiempo establecido. La dirección de proyectos emplea cierto tipo de procesos, caracterizados por entradas, herramientas y salidas que se obtienen de cada uno. Se debe tomar en cuenta que los proyectos existen siempre en el ámbito de alguna organización y no funcionan como un sistema cerrado, es decir, requieren datos de entrada procedentes de la organización y del exterior y producen capacidades para la organización.

Los procesos que se involucren en el proyecto pueden generar información para mejorar la gestión de futuros proyectos y de los activos de los procesos de la organización. Los procesos de dirección de proyectos se agrupan en cinco categorías conocidas como Grupos de Procesos de la Dirección de Proyectos. En la práctica, estos procesos se superponen y actúan unos sobre otros de múltiples formas. Los grupos de procesos se vinculan entre sí a través de las salidas que producen. La salida de un proceso, generalmente se convierte en la entrada para otro proceso en otra área de conocimiento. Los grupos de procesos no son fases del ciclo de vida del proyecto (PMI, 2013: 47).

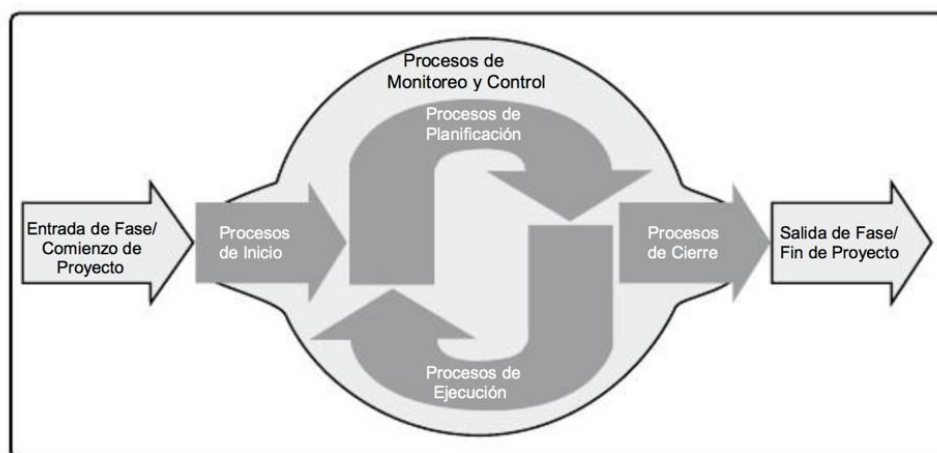
A continuación, los grupos de procesos de la dirección de proyectos:

1. Grupo de procesos de inicio: está compuesto por aquellos procesos realizados para definir un nuevo proyecto o una nueva fase de un proyecto existente. En este ámbito es donde se define el alcance inicial y se comprometen los recursos financieros iniciales.
2. Grupo de procesos de planeación: está compuesto por aquellos procesos realizados para establecer el alcance total del esfuerzo, definir y refinar los objetivos, y desarrollar la línea de acción requerida para alcanzarlos. Desarrollan el plan para la dirección del proyecto y los documentos del proyecto que se utilizarán para llevarlo a cabo.

3. Grupo de procesos de ejecución: aquellos procesos realizados para completar el trabajo definido en el plan para la dirección del proyecto a fin de satisfacer las especificaciones del mismo.
4. Grupo de procesos de monitoreo y control: son los procesos requeridos para rastrear, revisar y regular el progreso y el desempeño del proyecto, para identificar áreas en las que el plan requiera cambios y para iniciar los cambios correspondientes.
5. Grupo de procesos de cierre: se realizan para finalizar todas las actividades a través de todos los grupos de procesos, a fin de cerrar formalmente el proyecto o una fase del mismo (PMI, 2013: 49).

En la práctica, los procesos se superponen y actúan uno sobre otros de múltiples formas. La aplicación de los procesos en un proyecto es iterativa y muchos procesos se repiten a lo largo del proyecto. La naturaleza integradora de la dirección de proyectos requiere que el grupo de procesos de monitoreo y control y el resto de grupos de procesos ejerzan acciones uno sobre los otros de manera recíproca. Los procesos de monitoreo y control se considera como un grupo de procesos de fondo para los otros grupos de procesos. La naturaleza iterativa de la dirección de proyectos significa que se pueden reutilizar procesos de cualquier grupo a lo largo del ciclo de vida del proyecto (PMI, 2013 : 50).

Figura 44. Visualización de las interacciones de los distintos grupos de procesos de la Gestión de Proyectos



E. Áreas de conocimiento de la dirección de proyectos

La gestión del proyecto incluye distintas Áreas de Conocimiento, las cuales se entrelazan para buscar el cumplimiento de los objetivos. Un área de conocimiento representa un conjunto completo de conceptos, términos y actividades que confirman un ámbito profesional, un ámbito de la dirección de proyectos. La guía del PMI, el PMBOK, agrupa diez áreas de conocimiento diferenciadas, totalizando 47 procesos que se pueden utilizar en la administración de un proyecto. Las áreas de conocimiento son: Integración, Alcance, Tiempo, Costo, Calidad, Recursos Humanos, Comunicaciones, Riesgos, Adquisiciones e Interesados. Los 47 procesos de dirección de proyectos se distribuyen en estas áreas (PMI, 2013: 60).

1. Gestión de la integración del proyecto. La gestión de la integración de un proyecto se encarga de definir, unificar y coordinar los procesos y actividades de dirección del proyecto. La integración incluye características de consolidación, comunicación y otras acciones integradoras que buscan que la ejecución del proyecto sea controlada, cumpliendo con los requisitos. Los procesos de integración del proyecto llevan a la toma de decisiones en cuanto a la asignación de recursos, el equilibrio de objetivos, manejando las interdependencias entre Áreas de conocimiento.

Los procesos que incluye la integración del proyecto son los siguientes:

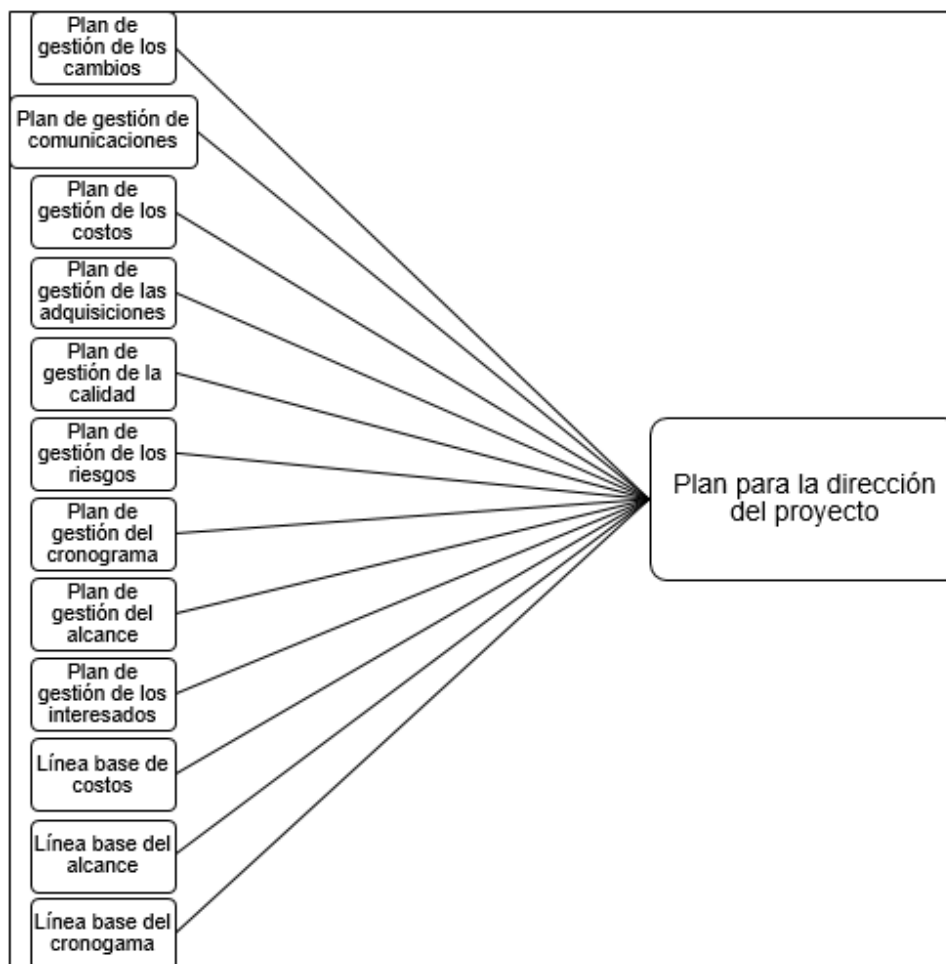
- Desarrollo del Acta de Constitución del Proyecto
- Desarrollo del Plan para la Dirección del Proyecto
- Dirección y Gestión del trabajo del Proyecto
- Monitoreo y control del trabajo del Proyecto
- Control integrado de cambios
- Cierre del Proyecto

(PMI, 2013: 63)

a. Acta de constitución del proyecto. La integración de un proyecto va atada a un documento que autoriza formalmente la existencia del proyecto y permite al director del proyecto tener una idea de los recursos y actividades que requiere el proyecto y cómo asignarlos. Este documento delimita el proyecto y establece los objetivos de forma directa. A partir de este documento se genera el Plan de Dirección del Proyecto y se planifican las gestiones del Alcance, del Cronograma, de los Costos, los Riesgos y los Interesados del Proyecto. Se documentan los supuestos, restricciones, las necesidades, y los resultados que el proyecto debe proporcionar (PMI, 2013: 66).

b. Plan de dirección del proyecto. Este documento define la forma en la que el proyecto se ejecuta, se monitorea y se cierra. La creación de este documento y sus actualizaciones va al lado del Control Integrado de Cambios. Se debe definir el ciclo de vida del proyecto, los planes de gestión secundarios (por área de conocimiento) y también las líneas base de las distintas áreas del proyecto. (PMI, 2013: 78)

Figura 45. Integración de los distintos planes de gestión hacia el plan de dirección del proyecto.



c. **Dirección y gestión del trabajo del proyecto.** Este proceso se encarga de la realización de las actividades necesarias para el cumplimiento de los objetivos, es decir, de generar los entregables del proyecto, en el tiempo planificado. Este proceso integra la obtención y administración de los recursos a usarse en el proyecto. La dirección del proyecto debe generar y documentar datos del desempeño del trabajo, en cuanto a costo, tiempo, avances técnicos y los aspectos generales del proyecto. Este proceso integrado se encarga de la solicitud e implementación de cambios en el alcance y planes del proyecto. La gestión del trabajo debe recopilar y documentar las lecciones aprendidas e implementar las actividades aprobadas de mejora del proceso (PMI, 2013: 80).

d. Control Integrado de cambios. El proceso de controlar los cambios consiste en analizar las solicitudes de cambio, aprobarles, y gestionar los cambios a los entregables, documentos del proyecto e integrarlo al plan de dirección del proyecto. Permite que exista una documentación integrada de los cambios realizados durante la ejecución del proyecto y simultáneamente, reduce el riesgo del proyecto. Este proceso interviene desde el inicio del proyecto hasta su finalización, generando alteraciones en los demás documentos del proyecto. Las salidas de este proceso incluyen un registro de cambios, que detalla los cambios y sus impactos en términos de tiempo, costos y riesgos (PMI, 2013: 94).

e. Cierre del proyecto. Este proceso consiste en finalizar todas las actividades y completar formalmente el proyecto (o fase). Proporciona un análisis de las lecciones aprendidas y la liberación de los recursos que utilizó el proyecto. Se revisa toda la información procedente de los cierres de fases previas para asegurar que el trabajo del proyecto se completó y que se alcanzaron los objetivos. Este proceso recibe información del plan de dirección y los entregables aceptados para entregar los resultados finales del proyecto. Este proceso también facilita la transferencia de la información a terceros.

2. Gestión del alcance del proyecto. La gestión del alcance del proyecto detalla los procesos necesarios para garantizar que el proyecto incluya únicamente el trabajo requerido para completar el proyecto de forma exitosa. Los procesos de esta área de conocimiento se enfocan en definir y controlar qué se incluye y qué no se incluye en el proyecto. La gestión del alcance del proyecto cuenta únicamente con procesos de planeación y de monitoreo. Los procesos que incluye la gestión del alcance del proyecto son los siguientes:

- Planificación del alcance del proyecto
- Recopilación de requisitos
- Definición del alcance
- Creación de EDT
- Validación del alcance

- Control del alcance

(PMI, 2013: 105)

a. Recopilación de requisitos. Es el proceso de determinar, documentar y gestionar las necesidades y los requisitos de los interesados para cumplir con los objetivos del proyecto. El beneficio clave de este proceso es que proporciona la base para definir y gestionar el alcance del proyecto, incluyendo el alcance del producto. A partir de este proceso se obtiene la matriz de trazabilidad de requisitos, la cual vincula los requisitos del producto desde su origen hasta los entregables que los satisfacen (PMI, 2013: 110).

b. Enunciado del alcance del proyecto. El enunciado del alcance del proyecto es la descripción del alcance, de los entregables principales, de los supuestos y de las restricciones del proyecto. Describe de manera detallada los entregables del proyecto entre los interesados del proyecto. Incluye la descripción de las características del producto a entregar y los criterios de aceptación, las restricciones y los supuestos. Este documento difiere del acta de constitución del proyecto en el nivel de detalle que se discute en cada documento, el enunciado del alcance es más detallado en cuanto a la descripción de los entregables (PMI, 2013: 123).

c. Estructura de desglose de trabajo. La estructura de desglose de trabajo, o EDT, proporciona una visión estructurada de lo que se debe entregar, en componentes pequeños y fáciles de manejar. Es una descomposición jerárquica del alcance total del trabajo a realizar por el equipo del proyecto para cumplir con los objetivos del trabajo especificado en el enunciado del alcance del proyecto. El trabajo planificado está contenido en el nivel más bajo de las componentes de la EDT, denominados paquetes de trabajo. Un paquete de trabajo se utiliza para agrupar las actividades donde el trabajo es programado y estimado, seguido y controlado. La EDT debe ir acompañada de un diccionario que proporciona información detallada sobre los entregables, actividades y programación de cada uno de los componentes de la EDT. Este documento funciona

como un apoyo de la EDT y puede incluir información como los recursos, los responsables y los criterios de aceptación de cada actividad. (PMI, 2013: 125).

d. Línea base del alcance. La línea base del alcance del proyecto es la versión aprobada del enunciado del alcance del proyecto, la EDT y su respectivo diccionario. Una línea base puede cambiarse solo mediante procedimientos formales de control de cambios y se utiliza como base de comparación durante la realización de los procesos de validación y control del alcance. Es un componente del plan para la dirección del proyecto (PMI, 2013: 131).

3. Gestión del tiempo en el proyecto. La gestión del tiempo del proyecto incluye los procesos requeridos para gestionar la terminación en plazo del proyecto. Esta área de conocimiento utiliza las salidas de los procesos para definir y secuenciar actividades, estimar los recursos necesarios para desarrollarlas y también estima las duraciones de la misma. Esta área de conocimiento contribuye al plan de dirección del proyecto por medio de la línea base del tiempo del proyecto. Los procesos que incluye la gestión del tiempo del proyecto son los siguientes:

- Planificación de la gestión del cronograma
- Definición de actividades
- Secuenciación de actividades
- Estimación de recursos de actividades
- Estimación de duración de las actividades
- Desarrollo del cronograma
- Control del cronograma

(PMI, 2013: 141)

a. Definición y secuenciación de actividades. Es el proceso de identificar y documentar las acciones específicas que se deben realizar para generar los entregables del proyecto. El beneficio clave de este proceso es el desglose de los paquetes de trabajo en actividades que proporcionan una base para la estimación, programación, ejecución

monitoreo y control del trabajo del proyecto. Este proceso produce una lista exhaustiva de todas las actividades del cronograma necesarias para el proyecto. A partir de esta lista, se realiza la secuenciación de las actividades, identificando y documentando las relaciones entre las actividades del proyecto. La secuenciación de las actividades produce un diagrama de red, que es la representación gráfica de las relaciones lógicas entre las actividades del cronograma del proyecto (PMI, 2013: 153).

1) Método de diagramación por precedencia. El método de diagramación por precedencia (PDM) es una técnica utilizada para construir un modelo de programación en el cual las actividades se representan mediante nodos y se vinculan gráficamente mediante una o más relaciones lógicas para indicar la secuencia en que deben ser ejecutadas. El de Actividad en el Nodo (AON) es uno de los métodos de representación de un diagrama de precedencia. Este es el método que utilizan la mayoría de los paquetes de software de gestión de proyectos. El PDM incluye cuatro tipos de dependencias o relaciones lógicas. Una actividad predecesora es una actividad que precede desde el punto de vista lógico a una actividad dependiente de la misma en un cronograma. Una actividad sucesora es una actividad dependiente que ocurre de manera lógica después de otra actividad en un cronograma. Las relaciones se definen a continuación:

- Final a Inicio (FS): se trata de una relación lógica en la cual una actividad sucesora no puede comenzar hasta que haya concluido una actividad predecesora.
- Final a Final (FF): se trata de una relación lógica en la cual una actividad sucesora no puede finalizar hasta que haya concluido una actividad predecesora.
- Inicio a Inicio (SS): se trata de una relación lógica en la cual una actividad sucesora no puede comenzar hasta que haya comenzado una actividad predecesora.
- Inicio a Final (SF): una relación lógica en la cual una actividad sucesora no puede finalizar hasta que la predecesora haya comenzado. (PMI, 2013: 156)

b. Estructura de desglose de recursos. La estructura de desglose de recursos es una representación jerárquica de los recursos por categoría y tipo. Algunos ejemplos de categorías son la mano de obra, el material, los equipos y los suministros. La estructura de desglose de recursos es útil para organizar y comunicar los datos del cronograma del proyecto, junto con información sobre la utilización de recursos. (PMI, 2013: 165)

c. Estimación de duración de las actividades. Es el proceso de realizar una estimación de la cantidad de períodos de trabajo necesarios para finalizar las actividades individuales con los recursos estimados. El beneficio clave de este proceso es que establece la cantidad de tiempo necesario para finalizar cada una de las actividades, lo cual constituye una entrada fundamental para el proceso del desarrollo del cronograma. En este proceso, el juicio de expertos y los demás miembros del equipo es fundamental. Existen distintos tipos de técnicas para estimar tiempos que se pueden aplicar a un proyecto en su totalidad o a partes del mismo, y puede utilizarse en conjunto con otros métodos de estimación. (PMI, 2013: 165)

1) Estimación análoga. La estimación análoga es una técnica para estimar la duración o el costo de una actividad o de un proyecto mediante la utilización de datos históricos de una actividad o proyecto similar. La estimación análoga utiliza parámetros de un proyecto o fase anterior similar, tales como duración, presupuesto y complejidad como base para estimar los mismos parámetros o medidas para un proyecto futuro. Es un método de estimación de valor bruto, que en ocasiones se ajusta en función de las diferencias conocidas en cuanto a la complejidad del proyecto. La estimación análoga se emplea a menudo cuando se dispone de escasa información de detalle sobre el mismo (PMI, 2013: 169).

2) Estimación paramétrica. La estimación paramétrica es una técnica de estimación en la que se utiliza un algoritmo para calcular el costo o la duración sobre la base de los datos históricos y los parámetros del proyecto. La estimación paramétrica utiliza una relación estadística entre datos históricos y otras variables para calcular una estimación de los parámetros de una actividad tales como costo, presupuesto y duración.

Las duraciones de las actividades pueden determinarse cuantitativamente multiplicando la cantidad de trabajo a realizar por la cantidad de horas de trabajo por unidad de trabajo. Con esta técnica pueden lograrse niveles superiores de exactitud, dependiendo de la sofisticación y de los datos que utilice el modelo. La estimación paramétrica de tiempo puede aplicarse a un proyecto en su totalidad o a partes del mismo, en conjunto con otros métodos de estimación. (PMI, 2013: 170)

3) Estimación por tres valores. La exactitud de las estimaciones de la duración de una actividad por un único valor puede mejorarse si se tienen en cuenta la incertidumbre y el riesgo. Este concepto se originó con la Técnica de Revisión y Evaluación de Programas (PERT). El método PERT utiliza tres estimaciones para definir un rango aproximado de duración de una actividad:

- Más probable [tM]: esta estimación se basa en la duración de la actividad, en función de los recursos que probablemente le sean asignados, de su productividad, de las expectativas realistas de disponibilidad para la actividad, de las dependencias de otros participantes y de las interrupciones.
- Optimista [tO]: estima la duración de la actividad sobre la base del análisis del mejor escenario posible para esa actividad.
- Pesimista [tP]: estima la duración de la actividad sobre la base del análisis del peor escenario posible para esa actividad.

Se puede calcular la duración esperada, tE , mediante el uso de una fórmula, en función de la distribución asumida de los valores dentro del rango de las tres estimaciones. Dos de las fórmulas más utilizadas son las distribuciones beta y triangular. Las fórmulas son las siguientes:

$$\text{Distribución Triangular: } tE = \frac{tO+tM+tP}{3}$$

$$\text{Distribución Beta (de la técnica PERT tradicional): } tE = \frac{tO+4tM+tP}{6}$$

Las duraciones estimadas por tres valores con una distribución determinada proporcionan una duración esperada y despejan el grado de incertidumbre sobre la duración esperada (PMI, 2013: 170).

d. Desarrollo de cronograma. Desarrollar el cronograma es el proceso de analizar las secuencias de actividades, las duraciones, los requisitos de recursos y las restricciones del cronograma para crear el modelo de programación del proyecto. Incorporar toda la información de las actividades, recursos y relaciones lógicas en la herramienta de programación genera un modelo con fechas planificadas para completar actividades del proyecto. El desarrollo de un cronograma aceptable del proyecto es a menudo un proceso iterativo. Se utiliza el modelo de programación para determinar las fechas planificadas de inicio y fin de actividades del proyecto, así como los hitos del mismo, sobre la base de exactitud de los datos de entrada. El análisis de la red del cronograma es una técnica que se utiliza para generar el cronograma del proyecto. Emplea diversas técnicas analíticas, tales como el método de la ruta crítica, el método de la cadena crítica y técnicas de optimización de recursos para calcular las fechas de inicio y finalización, tempranas y tardías, de las partes no completadas del proyecto. Algunos caminos de la red pueden tener puntos de convergencia o divergencia de rutas que se pueden identificar y emplear en el análisis de compresión del cronograma o en otros tipos de análisis (PMI, 2013: 172).

1) Método de la ruta crítica. El método de la ruta crítica se utiliza para estimar la duración mínima del proyecto y determinar el nivel de flexibilidad en la programación de los caminos de red lógicos dentro del cronograma. Esta técnica de análisis de la red del cronograma calcula las fechas de inicio y finalización, tempranas y tardías, para todas las actividades, sin tener en cuenta las limitaciones de recursos, y realiza un análisis que recorre hacia delante y hacia atrás toda la red del cronograma. La ruta crítica es la secuencia de actividades que representa el camino más largo a través de un proyecto y determina la menor duración posible del mismo. Las fechas de inicio y fin tempranas y tardías resultantes no constituyen necesariamente el cronograma del proyecto, sino que más bien indican los periodos dentro de los cuales se podrían llevar a cabo las actividades, teniendo en cuenta los parámetros introducidos en el modelo de

programación para duraciones de las actividades, relaciones lógicas, adelantos, retrasos y otras restricciones conocidas. El método de la ruta crítica se utiliza para determinar el nivel de flexibilidad en la programación de los caminos de red lógicos dentro del modelo de programación (PMI, 2013: 176).

2) Método de la cadena crítica. El método de la cadena crítica (CCM) es un método que se aplica al modelo de programación y que permite al equipo del proyecto colocar colchones en cualquier ruta del cronograma del proyecto para tener en cuenta los recursos limitados y las incertidumbres del proyecto. Se desarrolla a partir del enfoque del método de la ruta crítica y tiene en cuenta los efectos de la asignación, la optimización y la nivelación de los recursos, así como de la incertidumbre en la duración de las actividades que se encuentran en la ruta crítica y que se calculan mediante el método de la ruta crítica. Para ello, el método de la cadena crítica introduce el concepto de colchones y de gestión de colchones. El método de la cadena crítica utiliza actividades con duraciones que no contemplan márgenes de seguridad, relaciones lógicas ni disponibilidad de recursos, con colchones determinados estadísticamente y compuestos de los márgenes de seguridad agregados de las actividades en un punto determinado del cronograma del proyecto para tener en cuenta los recursos limitados y las incertidumbres asociados al proyecto. La ruta crítica con restricciones de recursos se conoce como cadena crítica.

El método de la cadena crítica agrega colchones de duración, que son actividades del cronograma que no requieren trabajo y que se utilizan para manejar la incertidumbre. Un colchón que se coloca al final de la cadena crítica. En consecuencia, en lugar de gestionar la holgura total de las rutas de red, el método de la cadena crítica se concentra en gestionar las duraciones restantes de los colchones en función de las duraciones restantes de las cadenas de tareas (PMI, 2013: 178).

Las salidas de un modelo de programación son representaciones del cronograma. El cronograma del proyecto es una salida de un modelo de programación que presenta actividades relacionadas con fechas planificadas, duraciones, hitos y recursos. El cronograma del proyecto debe contener, como mínimo, una fecha de inicio y una fecha de finalización planificadas para cada actividad. Si la planificación de recursos se realiza

en una etapa temprana, entonces el cronograma mantendrá su carácter preliminar hasta que se hayan confirmado las asignaciones de recursos y se hayan establecido las fechas de inicio y finalización programadas. El cronograma del proyecto se puede representar en forma de resumen, denominado a veces cronograma maestro o cronograma de hitos, o bien en forma detallada.

Un calendario del proyecto identifica los días y turnos de trabajo disponibles para las actividades del cronograma. Distingue entre los periodos de tiempo, en días o fracciones de días, disponibles para completar las actividades programadas y los periodos de tiempo no disponibles. Un modelo de programación podría requerir más de un calendario del proyecto para permitir considerar diferentes periodos de trabajo para algunas actividades a la hora de calcular el cronograma del proyecto. Los calendarios del proyecto son susceptibles de actualización (PMI, 2013: 182).

e. Línea base del cronograma. Una línea base del cronograma consiste en la versión aprobada de un modelo de programación que sólo se puede modificar a través de procedimientos formales de control de cambios y que se utiliza como base de comparación con los resultados reales. Durante el monitoreo y control las fechas aprobadas de la línea base se comparan con las fechas reales de inicio y finalización para determinar si se han producido desviaciones. Esta línea base también es un componente del plan de dirección del proyecto (PMI, 2013: 181).

4. Gestión de los costos del proyecto. La gestión de los costos del proyecto incluye los procesos relacionados con planificar, estimar, presupuestar, financiar, obtener financiamiento, gestionar y controlar los costos de modo que se complete el proyecto dentro del presupuesto aprobado. La gestión de los costos del proyecto debería tener en cuenta los requisitos de los interesados al gestionar los costos. Los diversos interesados medirán los costos del proyecto de diferentes maneras y en momentos diferentes. El costo de adquisición de un artículo, por ejemplo, puede medirse en el momento en que se toma la decisión o se hace el compromiso de adquirir el artículo en cuestión, cuando se realiza su pedido o se hace entrega del mismo, o cuando se incurre en el costo real o este se registra en el ámbito de la contabilidad del proyecto.

Los procesos que incluye la gestión de los costos del proyecto son los siguientes:

- Planificación de la gestión de los costos
- Estimación de costos
- Determinación del presupuesto
- Control de los costos

(PMI, 2013: 194)

a. Estimación de costos. Es el proceso que desarrolla una estimación aproximada de los recursos monetarios necesarios para completar las actividades del proyecto. Determina el monto de los costos requeridos para completar el trabajo del proyecto. Las estimaciones son una predicción basada sobre la información disponible en un momento determinado. Las estimaciones de costos incluyen la identificación y consideración de diversas alternativas para el cálculo de costos de cara a iniciar y completar el proyecto. Se estiman los costos para todos los recursos que se van a asignar al proyecto. Estos incluyen el personal, los materiales, el equipamiento, los servicios y las instalaciones. Se debe tomar en cuenta el costo de financiación o el costo de contingencia (PMI, 2013: 200).

1) Estimación análoga. La estimación análoga de costos utiliza los valores como el alcance, el costo, el presupuesto y la duración, o medidas de escala tales como el tamaño, el peso y la complejidad de un proyecto anterior similar, como base para estimar el mismo parámetro o medida para un proyecto actual. A la hora de estimar los costos, esta técnica utiliza el costo real de proyectos similares anteriores como base para estimar el costo del proyecto actual. Es un método de estimación del valor bruto, que en ocasiones se ajusta en función de diferencias conocidas en cuanto a la complejidad del proyecto. La estimación análoga de costos se emplea a menudo para estimar un valor cuando existe una cantidad limitada de información detallada sobre el proyecto, como es el caso, por ejemplo, en las fases iniciales del mismo. La estimación análoga de costos utiliza información histórica y juicio de expertos (PMI, 2013: 204).

2) **Estimación paramétrica.** La estimación paramétrica utiliza una relación estadística entre los datos históricos relevantes y otras variables para calcular una estimación del costo del trabajo del proyecto. Con esta técnica se pueden lograr niveles superiores de exactitud, en función de la sofisticación y de los datos que utilice el modelo (PMI, 2013: 205).

3) **Estimación ascendente.** La estimación ascendente es un método que sirve para estimar un componente del trabajo. El costo individual de cada paquete de trabajo o actividad se calcula con el mayor nivel posible de detalle. El costo detallado se resume posteriormente o se “acumula” en niveles superiores para fines de reporte y seguimiento. En general, la magnitud y complejidad de la actividad o del paquete de trabajo individuales influyen en el costo y la exactitud de la estimación ascendente de costos (PMI, 2013: 205).

4) **Estimación por tres valores.** Se puede mejorar la exactitud de las estimaciones de costos de una actividad única si se tienen en cuenta la incertidumbre y el riesgo y se utilizan estimaciones por tres valores para definir un rango aproximado del costo de la actividad:

- Más probable [cM]: El costo de la actividad se estima sobre la base de una evaluación realista del esfuerzo necesario para el trabajo requerido y de cualquier gasto previsto.
- Optimista [cO]: El costo de la actividad se estima sobre la base del análisis del mejor escenario para esa actividad.
- Pesimista [cP]: El costo de la actividad se estima sobre la base del análisis del peor escenario para esa actividad.

Se puede calcular el costo esperado, cE , mediante el uso de una fórmula, en función de la distribución asumida de los valores dentro del rango de las tres estimaciones. Dos de las fórmulas más utilizadas son las distribuciones triangulares y beta. Las estimaciones de costos basadas en tres valores con una distribución determinada proporcionan un costo

esperado y despejan el grado de incertidumbre sobre el costo esperado. Las formulas son las siguientes:

$$\text{Distribución Triangular: } cE = \frac{cO+cM+cP}{3}$$

$$\text{Distribución Beta (de la técnica PERT tradicional): } cE = \frac{cO+4cM+cP}{6}$$

(PMI, 2013: 205)

b. Análisis de reservas. Las estimaciones de costos pueden incluir reservas (denominadas a veces provisiones para contingencias) para tener en cuenta la incertidumbre sobre el costo. Las reservas para contingencias consisten en el presupuesto, dentro de la línea base de costos, que se destina a los riesgos identificados y asumidos por la organización, para los que se desarrollan respuestas de contingencia o mitigación. Las reservas para contingencias se contemplan a menudo como la parte del presupuesto destinada a cubrir los "conocidos- desconocidos" susceptibles de afectar al proyecto.

Las reservas para contingencias pueden cubrir una actividad específica, la totalidad del proyecto o ambas. La reserva para contingencias puede definirse como un porcentaje del costo estimado, como un monto fijo, o bien puede calcularse utilizando métodos de análisis cuantitativos. A medida que se dispone de información más precisa sobre el proyecto, la reserva para contingencias puede utilizarse, reducirse o eliminarse. Debería identificarse claramente la contingencia en la documentación de costos. Las reservas para contingencias forman parte de la línea base de costos y de los requisitos generales de financiamiento del proyecto.

También se pueden realizar estimaciones sobre la cantidad de reserva de gestión a financiar para el proyecto. Las reservas de gestión son cantidades específicas del presupuesto del proyecto que se retienen por razones de control de gestión y que se reservan para cubrir trabajo no previsto dentro del alcance del proyecto. (PMI, 2013: 206)

c. **Línea base del costo.** La línea base de costos es la versión aprobada del presupuesto, por fases del proyecto, excluida cualquier reserva de gestión, que sólo se puede cambiar a través de procedimientos formales. Se desarrolla como la suma de los presupuestos aprobados para las diferentes actividades del cronograma. Las estimaciones de los costos de las actividades, junto con cualquier reserva para contingencias para dichas actividades se agregan en los costos de sus paquetes de trabajo asociados. De la línea base de costos se derivan los requisitos de financiamiento totales y periódicos (PMI, 2013: 212).

5. **Gestión de la calidad.** La Gestión de la Calidad del Proyecto incluye los procesos y actividades de la organización ejecutora que establecen las políticas de calidad, los objetivos y las responsabilidades de calidad para que el proyecto satisfaga las necesidades para las que fue acometido. La gestión de la calidad del proyecto utiliza políticas y procedimientos para implementar el sistema de gestión de la calidad de la organización en el contexto del proyecto, y, en la forma que resulte adecuada, apoya las actividades de mejora continua del proceso, tal y como las lleva a cabo la organización ejecutora. La gestión de la calidad del proyecto trabaja para asegurar que se alcancen y se validen los requisitos del proyecto, incluidos los del producto. Los procesos que incluye la gestión de la calidad del proyecto son los siguientes:

- Planificar la Gestión de la calidad
- Realizar el aseguramiento de calidad
- Controlar la calidad

(PMI, 2013: 227)

a. **Realizar el aseguramiento de la calidad.** Este proceso implementa un conjunto de acciones y procesos planificados y sistemáticos que se definen en el ámbito del plan de gestión de calidad del proyecto. El aseguramiento de la calidad persigue construir confianza en que las salidas futuras o incompletas, conocidas como trabajo en curso, se completarán de tal manera que se cumplan los requisitos y expectativas establecidas. Este proceso se encarga de prevenir defectos. Este proceso también cubre la

mejora continua de los procesos dentro del proyecto. Una herramienta clave es el análisis de procesos, que busca determinar las mejoras necesarias en la ejecución del proyecto. Identifica las actividades que no añaden valor identificadas en la ejecución del proyecto. (PMI, 2013: 245)

6. Gestión de los recursos humanos. La gestión de los Recursos Humanos del Proyecto incluye los procesos que organizan, gestionan y conducen al equipo del proyecto. El equipo del proyecto está compuesto por las personas a las que se han asignado roles y responsabilidades para completar el proyecto. Los miembros del equipo del proyecto pueden tener diferentes conjuntos de habilidades, pueden estar asignados a tiempo completo o a tiempo parcial y se pueden incorporar o retirar del equipo conforme avanza el proyecto. También se puede referir a los miembros del equipo del proyecto como personal del proyecto. Si bien se asignan roles y responsabilidades específicos a cada miembro del equipo del proyecto, la participación de todos los miembros en la toma de decisiones y en la planificación del proyecto es beneficiosa. La participación de los miembros del equipo en la planificación aporta su experiencia al proceso y fortalece su compromiso con el proyecto. Los procesos que incluye la gestión de los recursos humanos del proyecto son los siguientes:

- Planificación de la Gestión de Recursos Humanos
- Adquisición del equipo del proyecto
- Desarrollo del equipo del proyecto
- Dirección del equipo del proyecto

(PMI, 2013: 255)

7. Gestión de las comunicaciones. La Gestión de las Comunicaciones del Proyecto incluye los procesos requeridos para asegurar que la planificación, recopilación, creación, distribución, almacenamiento, recuperación, gestión, control, monitoreo y disposición final de la información del proyecto sean oportunos y adecuados. Los directores de proyecto emplean la mayor parte de su tiempo comunicándose con los miembros del equipo y otros interesados en el proyecto, tanto si son internos (en todos los niveles de la

organización) como externos a la misma. Una comunicación eficaz crea un puente entre diferentes interesados que pueden tener diferentes antecedentes culturales y organizacionales, diferentes niveles de experiencia, y diferentes perspectivas e intereses, lo cual impacta o influye en la ejecución o resultado del proyecto. Los procesos involucrados en la gestión de las comunicaciones son:

- Planificación de la gestión de comunicaciones
- Gestionar las comunicaciones
- Controlar las comunicaciones

Las actividades de comunicación incluidas en estos procesos a menudo pueden presentar numerosas dimensiones potenciales que se han de tener en cuenta, incluyendo las proveniencia de la comunicación, su formalidad y su tipo (si es vertical u horizontal). (PMI, 2013: 287)

a. Reuniones. El proceso planificar la gestión de las comunicaciones necesita del debate y del dialogo con el equipo del proyecto a fin de determinar la manera más adecuada de actualizar y comunicar la información del proyecto, y de responder a las solicitudes de dicha información por parte de los interesados. Dichos debates y dicho dialogo normalmente se facilitan a través de reuniones, que se pueden llevar a cabo de manera presencial o en línea desde diferentes ubicaciones, como por ejemplo las instalaciones en que se desarrolla el proyecto o las instalaciones del cliente.

Existen distintos tipos de reuniones en las que se pueden producir comunicaciones relativas al proyecto. La mayoría de las reuniones de proyecto consisten en juntar a los interesados con objeto de resolver problemas o tomar decisiones. Aunque los debates informales se pueden considerar como reuniones, la mayoría de las reuniones de proyecto tienen un carácter más formal, con hora, lugar y agenda acordados previamente. Las reuniones típicas comienzan con una lista de asuntos a discutir, la cual se hace circular con anterioridad, acompañada de un acta y de información adicional específica para cada reunión. Dicha información luego se distribuye a otros interesados adecuados, según sea necesario. (PMI, 2013: 295)

8. Gestión de los riesgos en el proyecto. La gestión de los riesgos del proyecto incluye los procesos para llevar a cabo la planificación de la gestión de riesgos, así como la identificación, análisis, planificación de respuesta y control de los riesgos de un proyecto. Los objetivos de la gestión de los riesgos del proyecto consisten en aumentar la probabilidad y el impacto de los eventos positivos, y disminuir la probabilidad y el impacto de los eventos negativos en el proyecto. Los procesos involucrados en la gestión de los riesgos son:

- Planificar la gestión de los riesgos
- Identificación de riesgos
- Análisis cualitativo de riesgos
- Análisis cuantitativo de riesgos
- Planificar respuesta a riesgos
- Control de riesgos

El riesgo de un proyecto es un evento o condición incierta que, de producirse, tiene un efecto positivo o negativo en uno o más de los objetivos del proyecto, tales como el alcance, el cronograma, el costo y la calidad. Un riesgo puede tener una o más causas y, de materializarse, uno o más impactos. Una causa puede ser un requisito especificado o potencial, un supuesto, una restricción o una condición que crea la posibilidad de consecuencias tanto negativas como positivas. Los riesgos del proyecto tienen su origen en la incertidumbre que está presente en todos los proyectos. Los riesgos conocidos son aquellos que han sido identificados y analizados, lo que hace posible planificar respuestas para tales riesgos. A los riesgos conocidos que no se pueden gestionar de manera proactiva se les debe asignar una reserva para contingencias. Los riesgos desconocidos no se pueden gestionar de manera proactiva y por lo tanto se les puede asignar una reserva de gestión. Un riesgo negativo del proyecto que se ha materializado se considera un problema. Tolerancia al riesgo, que es el grado, cantidad o volumen de riesgo que podrá resistir una organización o individuo.

Los riesgos positivos y negativos se conocen normalmente como oportunidades y amenazas. El proyecto puede aceptarse si los riesgos se encuentran dentro de las tolerancias y están en equilibrio con el beneficio que puede obtenerse al asumirlos. Los riesgos positivos que ofrecen oportunidades dentro de los límites de la tolerancia al riesgo se pueden emprender a fin de generar un mayor valor. Por ejemplo, adoptar una técnica de optimización de recursos agresiva constituye un riesgo que se asume a la espera de un beneficio como consecuencia de utilizar menos recursos. (PMI, 2013: 309)

a. Identificación de riesgos. Identificar los riesgos es el proceso de determinar los riesgos que pueden afectar al proyecto y documentar sus características. El beneficio clave de este proceso es la documentación de los riesgos existentes y el conocimiento y la capacidad que confiere al equipo del proyecto para anticipar eventos. Los participantes en las actividades de identificación de riesgos pueden incluir: el director del proyecto, los miembros del equipo del proyecto, el equipo de gestión de riesgos (si está asignado), clientes, expertos en la materia externos al equipo del proyecto, usuarios finales, otros directores de proyecto, interesados y expertos en gestión de riesgos. Si bien estas personas son a menudo participantes clave en la identificación de riesgos, se debería fomentar la identificación de riesgos potenciales por parte de todo el personal del proyecto. Los riesgos identificados se describen con un nivel de detalle razonable. (PMI, 2013: 319)

b. Análisis cualitativo de riesgos. Evalúa la prioridad de los riesgos identificados a través de la probabilidad relativa de ocurrencia, del impacto correspondiente sobre los objetivos del proyecto si los riesgos llegaran a presentarse, así como de otros factores, tales como el plazo de respuesta y la tolerancia al riesgo por parte de la organización, asociados con las restricciones del proyecto en términos de costo, cronograma, alcance y calidad. Dichas evaluaciones reflejan la actitud frente a los riesgos, tanto del equipo del proyecto como de otros interesados. Por lo tanto, una evaluación eficaz requiere la identificación explícita y la gestión de los enfoques frente al riesgo por parte de los participantes clave en el marco del proceso Realizar el Análisis Cualitativo de Riesgos. Cuando estos enfoques frente al riesgo introducen sesgos en la

evaluación de los riesgos identificados, debe prestarse atención en la identificación de dichos sesgos y en su corrección.

Para cada uno de los riesgos identificados, se evalúan la probabilidad y el impacto. Los riesgos se pueden evaluar a través de entrevistas o reuniones con participantes seleccionados por estar familiarizados con las categorías de riesgo incluidas en la agenda. Entre ellos se incluyen los miembros del equipo del proyecto y expertos que no pertenecen al proyecto.

Las probabilidades e impactos de los riesgos se califican de acuerdo con las definiciones proporcionadas en el plan de gestión de los riesgos. Los riesgos con una baja calificación en cuanto a probabilidad e impacto se incluirán en el registro de riesgos como parte de una lista de observación para su futuro monitoreo.

Los riesgos se pueden priorizar con vistas a un análisis cuantitativo posterior y a la planificación de respuestas basadas en su calificación. Las calificaciones se asignan a los riesgos con base en la probabilidad y al impacto previamente evaluados. Por lo general, la evaluación de la importancia de cada riesgo y de su prioridad de atención se efectúa utilizando una tabla de búsqueda o una matriz de probabilidad e impacto. Dicha matriz especifica las combinaciones de probabilidad e impacto que llevan a calificar los riesgos con una prioridad baja, moderada o alta. La calificación de los riesgos ayuda a definir las respuestas a los mismos. Por ejemplo, los riesgos que tienen un impacto negativo sobre los objetivos, conocidos como amenazas cuando se materializan, y que se encuentran en la zona de riesgo alto de la matriz, pueden requerir prioridad en la acción y estrategias de respuesta agresivas. Las amenazas que se encuentran en la zona de riesgo bajo pueden no requerir una acción de gestión proactiva, más allá de ser incluidas en el registro de riesgos como parte de la lista de observación o de ser agregadas a una reserva para contingencias. Lo mismo ocurre para las oportunidades, debe darse prioridad a las oportunidades que se encuentran en la zona de riesgo alto, ya que se pueden obtener más fácilmente y proporcionar mayores beneficios. Las oportunidades en la zona de riesgo bajo deben monitorearse (PMI, 2013: 330).

c. Análisis cuantitativo de riesgos. Realizar el análisis cuantitativo de riesgos es el proceso de analizar numéricamente el efecto de los riesgos identificados sobre los objetivos generales del proyecto. El beneficio clave de este proceso es que genera información cuantitativa sobre los riesgos para apoyar la toma de decisiones a fin de reducir la incertidumbre del proyecto. Por lo general, el proceso realizar el análisis cuantitativo de riesgos se realiza después del proceso realizar el análisis cualitativo de riesgos. realizar el análisis cuantitativo de riesgos analiza el efecto de dichos riesgos sobre los objetivos del proyecto. Se utiliza fundamentalmente para evaluar el efecto acumulativo de todos los riesgos que afectan el proyecto (PMI, 2013: 333).

d. Planificación de respuestas a los riesgos. Es el proceso de desarrollar opciones y acciones para mejorar las oportunidades y reducir las amenazas a los objetivos del proyecto. El beneficio clave de este proceso es que aborda los riesgos en función de su prioridad, introduciendo recursos y actividades en el presupuesto, el cronograma y el plan para la dirección del proyecto, según las necesidades. Cada respuesta a un riesgo requiere una comprensión del mecanismo por el cual se abordará el riesgo. Este es el mecanismo utilizado para analizar si el plan de respuesta a los riesgos está teniendo el efecto deseado. Se desarrollan acciones específicas para implementar esa estrategia, incluidas estrategias principales y de refuerzo, según sea necesario. Puede desarrollarse un plan de reserva, que se implementará si la estrategia seleccionada no resulta totalmente efectiva o si se produce un riesgo aceptado. También deben revisarse los riesgos secundarios. Los riesgos secundarios son riesgos que surgen como resultado directo de la implementación de una respuesta a los riesgos. A menudo se asigna una reserva para contingencias de tiempo o costo. En los casos en que ésta se establece, el plan puede incluir la identificación de las condiciones que suscitan su utilización. (PMI, 2013: 342)

9. Gestión de las adquisiciones del proyecto. La gestión de las adquisiciones del proyecto incluye los procesos necesarios para comprar o adquirir productos, servicios o

resultados que es preciso obtener fuera del equipo del proyecto. La organización puede ser la compradora o vendedora de los productos, servicios o resultados de un proyecto.

Los procesos involucrados en la gestión de las adquisiciones son:

- Planificación de la gestión de adquisiciones
- Efectuar adquisiciones
- Controlar adquisiciones
- Cerrar adquisiciones

(PMI, 2013: 355)

El análisis de hacer o comprar es una técnica general de gestión utilizada para determinar si un trabajo particular puede ser realizado de manera satisfactoria por el equipo del proyecto o debe ser adquirido de fuentes externas. Es posible que la organización del proyecto cuente con la capacidad necesaria, pero que la misma se encuentre comprometida con otros proyectos, en cuyo caso el proyecto en cuestión podría requerir que los esfuerzos sean suministrados por una organización externa a fin de cumplir con los compromisos establecidos en el cronograma.

Las restricciones al presupuesto pueden influir en las decisiones de hacer o comprar. Si se decide efectuar una compra, entonces también deberá decidirse si se va a adquirir o a alquilar. Un análisis de hacer o comprar debe tener en cuenta todos los costos relacionados, tanto directos como indirectos de apoyo. Por ejemplo, el análisis de la alternativa de compra incluye tanto los costos reales de compra del producto como los costos indirectos de apoyo al proceso de adquisición y al elemento comprado.

Los criterios de selección de proveedores se incluyen a menudo como parte de los documentos de las adquisiciones. Dichos criterios se desarrollan y utilizan para evaluar o calificar las propuestas de los vendedores, y pueden ser objetivos o subjetivos. Los criterios de selección pueden limitarse al precio de compra si el artículo que se va a adquirir está fácilmente disponible a través de varios vendedores aceptables. En este contexto, el precio de compra incluye tanto el costo del artículo como cualquier gasto accesorio, por ejemplo, los gastos de entrega. Se pueden identificar y documentar otros

criterios de selección para apoyar la evaluación en el caso de productos, servicios o resultados más complejos. Entre los posibles criterios de selección de proveedores se cuentan:

- Comprensión de la necesidad
- Costo total
- Riesgo
- Enfoque de gestión
- Enfoque técnico
- Capacidad de producción
- Tamaño y tipo de negocio
- Desempeño pasado de los vendedores
- Referencias

(PMI, 2013: 365)

10. Gestión de los interesados del proyecto. La gestión de los interesados del proyecto incluye los procesos necesarios para identificar a las personas, grupos u organizaciones que pueden afectar o ser afectados por el proyecto, para analizar las expectativas de los interesados y su impacto en el proyecto, y para desarrollar estrategias de gestión adecuadas a fin de lograr la participación eficaz de los interesados en las decisiones y en la ejecución del proyecto. La gestión de los interesados también se centra en la comunicación continua con los interesados para comprender sus necesidades y expectativas, abordando los incidentes en el momento en que ocurren, gestionando conflictos de intereses y fomentando una adecuada participación de los interesados en las decisiones y actividades del proyecto. La satisfacción de los interesados debe gestionarse como uno de los objetivos clave del proyecto. Los procesos asociados a esta gestión son los siguientes:

- Identificación de los interesados
- Planificar gestión de los interesados
- Gestión de la participación de los interesados
- Control de la participación de los interesados

(PMI, 2013: 391)

a. Matriz de análisis de interesados. El análisis de interesados es una técnica que consiste en recopilar y analizar de manera sistemática información cuantitativa y cualitativa, a fin de determinar qué intereses particulares deben tenerse en cuenta a lo largo del proyecto. Permite identificar los intereses, las expectativas y la influencia de los interesados y relacionarlos con el propósito del proyecto. También ayuda a identificar las relaciones de los interesados (con el proyecto y con otros interesados) que se pueden aprovechar para crear alianzas y posibles asociaciones para mejorar las probabilidades de éxito del proyecto, así como las relaciones de los interesados sobre las que habría que influir de manera diferente en diversas etapas del proyecto o fase.

En general, el análisis de interesados sigue los siguientes pasos:

- Identificar a todos los interesados potenciales del proyecto y toda la información relevante, como por ejemplo sus roles, departamentos, intereses, conocimientos, expectativas y niveles de influencia. Por lo general resulta sencillo identificar a los interesados clave. Incluyen a cualquiera con un rol de dirección o de toma de decisiones, que se ve impactado por el resultado del proyecto, como por ejemplo el patrocinador, el director del proyecto y el cliente principal. Para identificar a los demás interesados, normalmente se entrevista a los interesados identificados y se amplía la lista hasta incluir a todos los interesados potenciales (PMI, 2013: 396).
- Analizar el impacto o apoyo potencial que cada interesado podría generar y clasificarlos para definir una estrategia de aproximación. En el caso de grandes comunidades de interesados, es importante priorizar a los interesados a fin de garantizar el uso eficiente del esfuerzo para comunicar y gestionar sus expectativas (PMI, 2013: 396).

Evaluar el modo en que los interesados clave pueden reaccionar o responder en diferentes situaciones, a fin de planificar como influir en ellos para mejorar su apoyo y mitigar los impactos negativos potenciales (PMI, 2013: 396).

F. Gestión del valor ganado

La gestión del valor ganado (EVM) es una metodología que combina medidas de alcance, cronograma y recursos para evaluar el desempeño y el avance del proyecto. Es un método muy utilizado para la medida del desempeño de los proyectos. Integra la línea base del alcance con la línea base de costos, junto con la línea base del cronograma, para generar la línea base para la medición del desempeño, que facilita la evaluación y la medida del desempeño y del avance del proyecto por parte del equipo del proyecto. Es una técnica de dirección de proyectos que requiere la constitución de una línea base integrada con respecto a la cual se pueda medir el desempeño a lo largo del proyecto. Los principios del EVM se pueden aplicar a todos los proyectos, en cualquier sector. (PMI, 2013: 217)

1. Valor planificado. El valor planificado [*PV*] es el presupuesto autorizado que se ha asignado al trabajo programado. Es el presupuesto autorizado asignado al trabajo que debe ejecutarse para completar una actividad o un componente de la estructura de desglose del trabajo, sin contar con la reserva de gestión. Este presupuesto se adjudica por fase a lo largo del proyecto, pero para un momento determinado, el valor planificado establece el trabajo físico que se debería haber llevado a cabo hasta ese momento. El valor planificado total para el proyecto también se conoce como presupuesto hasta la conclusión [*BAC*]. (PMI, 2013: 218)

2. Valor ganado. El valor ganado [*EV*] es la medida del trabajo realizado en términos de presupuesto autorizado para dicho trabajo. Es el presupuesto asociado con el trabajo autorizado que se ha completado. El *EV* medido no puede ser mayor que el presupuesto aprobado del *PV* para un componente. El *EV* se utiliza a menudo para calcular el porcentaje completado de un proyecto. Deben establecerse criterios de medición del avance para cada componente de la EDT, con objeto de medir el trabajo en curso. Los directores de proyecto monitorean el *EV*, tanto sus incrementos para determinar el estado actual, como el total acumulado, para establecer las tendencias de desempeño a largo plazo. (PMI, 2013: 218)

3. Costo real. El costo real [*AC*] es el costo incurrido por el trabajo llevado a cabo en una actividad durante un periodo de tiempo específico. Es el costo total en el que se ha incurrido para llevar a cabo el trabajo medido por el *EV*. El *AC* debe corresponderse, en cuanto a definición, con lo que haya sido presupuestado para el *PV* y medido por el *EV* (p.ej., solo horas directas, solo costos directos o todos los costos, incluidos los costos indirectos). El *AC* no tiene límite superior; se medirán todos los costos en los que se incurra para obtener el *EV*. (PMI, 2013: 218)

4. Variación del cronograma. La variación del cronograma [*SV*] es una medida de desempeño del cronograma que se expresa como la diferencia entre el valor ganado y el valor planificado. Determina en qué medida el proyecto está adelantado o retrasado en relación con la fecha de entrega, en un momento determinado. Es una medida del desempeño del cronograma en un proyecto. Es igual al valor ganado *EV* menos el valor planificado *PV*. En el EVM, la variación del cronograma es una métrica útil, ya que puede indicar un retraso del proyecto con respecto a la línea base del cronograma. La variación del cronograma en el EVM en última instancia será igual a cero cuando se complete el proyecto, porque ya se habrán devengado todos los valores planificados (PMI, 2013: 218).

$$SV = EV - PV$$

5. Variación del costo. La variación del costo [*CV*] es el monto del déficit o superávit presupuestario en un momento dado, expresado como la diferencia entre el valor ganado y el costo real. Es una medida del desempeño del costo en un proyecto. Es igual al valor ganado *EV* menos el costo real *AC*. La variación del costo al final del proyecto será la diferencia entre el presupuesto hasta la conclusión y la cantidad realmente gastada. La *CV* es particularmente crítica porque indica la relación entre el desempeño real y los costos incurridos. Una *CV* negativa es a menudo difícil de recuperar para el proyecto (PMI, 2013: 218) .

$$CV = EV - AC$$

6. Índice de desempeño del cronograma. El índice de desempeño del cronograma [*SPI*] es una medida de eficiencia del cronograma que se expresa como la razón entre el valor ganado y el valor planificado. Refleja la medida de la eficiencia con que el equipo del proyecto está utilizando su tiempo. En ocasiones se utiliza en combinación con el índice de desempeño del costo para proyectar las estimaciones finales a la conclusión del proyecto. Un valor de *SPI* inferior a 1,0 indica que la cantidad de trabajo llevada a cabo es menor que la prevista. Un valor de *SPI* superior a 1,0 indica que la cantidad de trabajo efectuada es mayor a la prevista. Puesto que el *SPI* mide todo el trabajo del proyecto, se debe analizar asimismo el desempeño en la ruta crítica, para así determinar si el proyecto terminará antes o después de la fecha de finalización programada (PMI, 2013: 219).

$$SPI = \frac{EV}{PV}$$

7. Índice de desempeño del costo. El índice de desempeño del costo [*CPI*] es una medida de eficiencia del costo de los recursos presupuestados, expresado como la razón entre el valor ganado y el costo real. Se considera la métrica más crítica del EVM y mide la eficiencia del costo para el trabajo completado. Un valor de *CPI* inferior a 1,0 indica un costo superior al planificado con respecto al trabajo completado. Un valor de *CPI* superior a 1,0 indica un costo inferior con respecto al desempeño hasta la fecha. El *CPI* es igual a la razón entre el *EV* y el *AC*. Los índices son útiles para determinar el estado de un proyecto y proporcionar una base para la estimación del costo y del cronograma al final del proyecto (PMI, 2013: 219).

$$CPI = \frac{EV}{AC}$$

VIII. CALIDAD DE AGUA

La calidad de agua confiere a los parámetros químicos, biológicos, físicos del agua, que se encuentran definidos para diferentes propósitos de uso, algunos de ellos son:

A. Sólidos en el agua

Este parámetro es definido por tres factores relacionados, sólidos totales en el agua (TS, por sus siglas en inglés), sólidos disueltos en el agua (TDS, por sus siglas en inglés) y sólidos suspendidos totales en el agua (TSS, por sus siglas en inglés). El TSS se calcula generalmente mediante la sustracción de los TDS de los TS ($TSS = TS - TDS$). Son parámetros de calidad de agua, ya que permiten conocer las proporciones totales de minerales, sales, metales, ione y floculos en el agua (Beran, 2010).

B. Conductividad eléctrica

La conductividad σ de un material caracteriza la capacidad de ese material para conducir corriente, se define como el radio entre la densidad de corriente y la intensidad de corriente eléctrica del campo. En el agua y materiales iónicos o fluidos puede generarse por el movimiento de una red de iones cargados, generando corriente eléctrica; denominada conducción iónica. Es dependiente de la presencia, concentración, movilidad, valencia de los iones y temperatura ambiental a la que está expuesta (Lenntech, 2015). Representa el recíproco de la resistencia medida entre dos electrodos de 1.0cm², separados por 1.0 cm. Los valores son representados en microsimenens por cm ($\mu S/cm$) o micromohos/cm ($\mu\Omega^{-1}/cm$). (Roldan, 2003). La conductividad puede relacionarse con la pureza química del agua; determinada por la menor concentración de electrolitos en el agua, por lo tanto, mayor es la resistencia del medio a transmitir una corriente eléctrica. El índice TDS es una medida de la concentración de sólidos (Lenntech, 2015). En soluciones en disolución, el TDS es comparables con la conductividad eléctrica en una muestra de agua basada mediante la siguiente expresión:

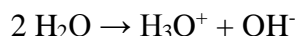
$$TDS (ppm) = \frac{\text{conductividad} \left(\frac{\mu S}{cm} \right)}{2}$$

(Pasco)

Parámetros de TDS para diferentes tipos de agua:

- Agua ultra pura: 0.05-0.75 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Pasco)
- Agua bebible: 50 - 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Pasco)
- Agua de mar: aprox. 53,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Pasco)

A medida que el agua disminuye su conductividad, por los tratamientos a los que es sometida, se disminuye la cantidad de sólidos disueltos. Por definición únicamente presenta H_2O , iones H^+ y OH^- en equilibrio (Roldán, 2003).



(Roldán, 2003)

C. Resistividad

La resistividad es la resistencia ($\mu\Omega$) característica de un material de un cubo de 1 cm de arista, a una corriente de electricidad, por lo que se define como el grado de dificultad que presentan los electrones en desplazarse. Al obtener el agua de un equipo purificador y almacenarlo en un depósito, el agua absorbe el dióxido de carbono del aire; formando ácido carbónico y reduciendo la resistividad de 18.2 $\mu\Omega/\text{cm}$ a 1.3 $\mu\Omega/\text{cm}$ (Cárdenas y Galvis, 2011).

D. Absorbancia

La ley de absorción, también conocida como Ley de Beer-Lambert, es la forma de medición cuantitativa de la dependencia del grado de atenuación según la concentración de las moléculas absorbentes y la longitud del trayecto en el que ocurre la absorción. Al momento que la luz pasa por un medio que contiene un analito absorbente, ocurre una disminución en la intensidad del haz a causa de la excitación de las moléculas. A medida que aumenta el largo del medio, de la solución que contiene el analito a una concentración específica, habrá más moléculas o átomos absorbentes en el trayecto por lo que el haz de luz que lo atraviesa será atenuado. De forma análoga, a una longitud de trayecto definida al aumentar la concentración de moléculas o átomos que absorben, será atenuado el haz (Skoog, 2009).

Si el haz de luz es una radiación monocromática, y esta atraviesa una solución absorbente con una longitud b y una concentración c , la fuerza radiante del haz es reducida de intensidad de P_0 a P . La transmitancia de una solución es la fracción de la radiación incidente que se transmite en la solución $T = P / P_0$, es frecuente expresarla como un porcentaje, denominado porcentaje de transmitancia. La absorbancia A de una solución se relaciona con el inverso de la transmitancia de forma logarítmica, como en la ecuación (Skoog, 2009).

$$A = acb = \log_{10} \left(\frac{1}{T} \right) = \log_{10} \left(\frac{P_0}{P} \right)$$

(Skoog, 2009)

Esta es la Ley de Beer-Lambert en donde “ A ” es absorbancia, “ b ” es la longitud del trayecto, “ c ” es la concentración de la especie absorbente, “ a ” es el coeficiente de absorptividad. P_0 es la intensidad inicial de haz de luz y P intensidad de la luz transmitida en el medio.

Generalmente, la absorbancia y la transmitancia son medidas experimentalmente en algún tipo de recipiente. En las paredes de la celda son posibles las pérdidas por reflexión y dispersión, las cuales pueden ser considerables. La luz también puede ser dispersada en todas las direcciones desde la superficie de las moléculas o partículas grandes (como el polvo) en el disolvente y causar la atenuación adicional del haz a su paso por la solución. La compensación de este efecto requiere comparar la energía de un haz que se transmite por una celda que contiene la solución del analito con la energía de un haz que cruce una celda idéntica que solo contiene el disolvente o un blanco. Por lo que se observa una absorbancia experimental, aproximada a la absorbancia verdadera de la solución (Skoog, 2009).

La ley de Beer-Lambert puede ser reorganizada de la siguiente forma:

$$\log(P) = \log(P_0) - acb$$

(Shang-q *et al*, 2011)

Si la intensidad del haz de luz inicial (P_0) y la concentración (c) ya se encuentran definidas, la absorptividad molar puede ser calculada mediante la medición de la

intensidad de la luz transmitida y el largo de la trayectoria del haz. Además, el hecho que la atenuación del agua se encuentra definida como la distancia de la fuente del haz de luz absorbida el 99%, esta equivale al recíproco de la absorptividad. Por lo que la atenuación de la solución puede ser calculada mediante $1/ac$ (Shang-q *et al*, 2011). Con base en las correlaciones mencionadas, la absorbancia es considerada como un parámetro de calidad de agua; al presentar menor absorbancia, tendrá menor presencia de agentes absorbentes a una longitud de onda específica (Skoog, 2009).

E. Turbidez

La turbidez es la dificultad del agua para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos. Estos materiales conllevan dificultades de filtración o decantación al momento de tratar el agua, un factor importante a mencionar es que pueden dar lugar a la formación de depósitos en los conductos de agua o superficies (Rigola, 1989). La turbidez se mide en unidades nefelométricas de turbidez (NTU, por sus siglas en inglés). El instrumento utilizado para su medición se llama nefelómetro o turbidímetro, el cual mide la intensidad de la luz dispersada, a 90 grados, de un haz de luz que se propaga en una muestra de agua. En el caso de aguas municipales, la turbidez no debe sobrepasar los 5NTU (Sánchez, Herzig y Peters, 2007). Para reducir la turbidez en el agua, generalmente se utilizan proceso de coagulación y decantación (Rigola, 1989).

F. pH

El pH es una medida de concentración de iones hidrógeno, se encuentra definida como $pH = \log(1/[H^+])$. Es útil en mediciones de naturaleza ácida o alcalina de soluciones acuosas que pueden afectar a los usos específicos del agua. Su medición se realiza con potenciómetros calibrados o papeles especiales para indicar el pH (Rigola, 1989).

G. Tratamiento de agua

1. Sedimentación. Este es la metodología de tratamiento de agua y aguas residuales más antigua y de uso extendido. Se emplea el asentamiento por gravedad para separar las partículas del agua. La sedimentación puede realizarse después de un tratamiento de

coagulación/floculación (para aguas muy turbias) u omitirse por completo (con aguas de turbidez moderada). El agua que contiene las partículas fluye con lentitud a través de un tanque de sedimentación, y de esta forma se retiene suficiente para que las partículas más grandes se asienten en el fondo antes de que el agua clarificada salga del tanque por un vertedero en el extremo salida. Las partículas sedimentadas son retiradas de forma manual. El tiempo de retención típico es de 3 horas en tanques de 3 a 5 m de profundidad (Glynn y Heinke, 1999).

2. Coagulación/Floculación. Proceso físico y químico en el que las partículas de pequeño tamaño, para poder asentarse por sedimentación simple, son desestabilizadas y aglomeradas para acelerar su asentamiento. La coagulación es un proceso químico que desestabiliza las partículas coloidales, que consiste en la adición de un producto químico que aporta iones de carga positiva al agua, la cual contiene coloides con carga negativa. Las reacciones producidas reducen la tendencia de los coloides a repelerse entre sí. En este proceso es necesario un mezclado rápido de segundos para dispersar el coagulante. Consecuentemente, se realiza un mezclado suave de la suspensión, llamado floculación, para promover el contacto entre partículas. Esto es posible conseguirlo por mezclado mecánico mediante el uso de paletas que giran lentamente dentro del tanque de coagulación/floculación o por mezclado hidráulico, que es producido cuando el flujo se dirige por encima y alrededor de los deflectores del tanque. El tiempo de retención en el tanque de coagulación/floculación varía por lo común entre 20 y 40 minutos en tanques de 3 a 4 metros de profundidad. Por medio de este proceso las partículas coloidales que no se asientan por sedimentación simple se aglomeran para formar sólidos más grandes llamados flóculos. El sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14.3 \cdot H_2O$, también conocido como alumbre, es el coagulante más común (Glynn y Heinke, 1999). Su proceso de coagulación procede en tres etapas:

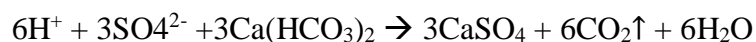
- a. El alumbre es ionizado en el agua, produciendo iones Al^{3+} y SO_4^{2-} . Algunos iones de $Al(OH)_3$ neutralizan la carga negativa de los coloides (Glynn y Heinke, 1999).
- b. La mayor parte de los iones Al^{3+} se combinan con iones OH^- del agua para formar $Al(OH)_3$ coloidal, el cual absorbe iones positivos de la solución:



(Glynn y Heinke, 1999)

- c. El $\text{Al}(\text{OH})_3$ en solución con carga positiva ayuda a neutralizar los coloides negativos, el exceso es neutralizado por SO_4^{2-} para producir un precipitado de $\text{Al}(\text{OH})_3$ y sulfatos absorbidos (Glynn y Heinke, 1999).

El exceso de H^+ producido es neutralizado por la alcalinidad (HCO_3^-) presente en el agua de acuerdo a la ecuación:



(Glynn y Heinke, 1999)

La reacción global que combina las reacciones anteriores consiste en:



(Glynn y Heinke, 1999)

Indicando que cada 600 partes de alumbre para filtros consumen 300 partes de alcalinidad, la cual es expresada en términos de CaCO_3 . El efecto químico global es la disminución del pH, una conversión de parte de la dureza de calcio [$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$] en dureza de sulfato de CaSO_4 , y la producción de CO_2 . Si la alcalinidad del agua no es suficiente para que la reacción se lleve a cabo, se debe aumentar el pH agregando cal [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], carbonato de sodio (Na_2CO_3) o hidróxido de sodio (NaOH). El pH óptimo para la coagulación con alumbre es arriba de 6 (Glynn y Heinke, 1999).

IX. PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

La propagación de las ondas electromagnéticas, que atraviesan la materia, se encuentra gobernada por tres propiedades de los materiales: la permitividad eléctrica¹¹ ϵ , la permeabilidad magnética¹² μ y la conductividad σ . Cada uno de estos parámetros depende de la frecuencia de las ondas en consideración. La conductividad se toma en cuenta en casos en los que no se controla independientemente el flujo de la carga en el medio (Griffiths, 1999).

A. Índice de refracción

En diferentes materiales transparentes ópticamente, la luz viaja a diferentes velocidades. El índice de refracción n es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el material. Cuando la luz atraviesa la frontera entre dos materiales transparentes, parte de ella es reflejada y parte de la luz atraviesa el límite hacia el otro material y el proceso se refracta. La refracción significa que los rayos de la luz no viajan en línea recta por la frontera, sino que cambian de dirección (Bauer y Westfall. 2011).

$$n = \frac{c}{v}$$

Para un medio en el que no hay cargas libres o una corriente, es lineal y homogéneo, las ondas electromagnéticas se distribuyen a una velocidad $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{n}$, en donde el índice de refracción es:

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

La ecuación anterior corresponde al índice de refracción, en donde $\epsilon \mu$ y $\epsilon_0 \mu_0$ son la permitividad eléctrica y permeabilidad magnética para el medio y el vacío,

¹¹ Constante que involucra el efecto de un campo eléctrico sobre un medio, y viceversa (Ley de Coulomb). La permitividad eléctrica en el vacío es $\epsilon_0 = 8.85 * 10^{-12} C^2 / N m^2$

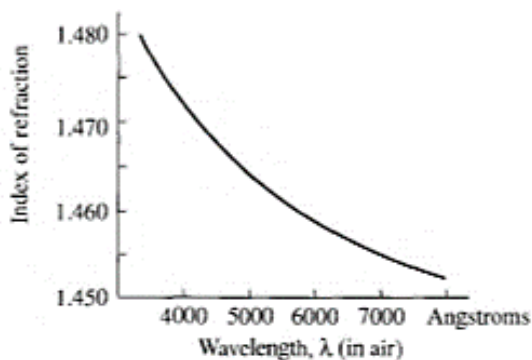
¹² Constante que involucrada el paso de campo magnético producido por una corriente en un medio (Ley de Biot-Savart). La permeabilidad magnética del espacio libre es $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} T m / A$.

respectivamente. ϵ_r es la permitividad eléctrica relativas (también llamada constante dieléctrica) y μ_r es la permeabilidad magnética relativa

El hecho de involucrar la permitividad eléctrica y permeabilidad magnética del medio en la descripción del comportamiento, involucra que a medida que la onda atraviesa el medio, el medio polariza y magnetiza fuertemente las moléculas, y los dipolos resultantes crean su propio campo eléctrico y magnético. Al combinarse con el campo original generan una sola onda, con la misma frecuencia, pero con diferente velocidad. Además, se sabe que ϵ_r es casi siempre mayor a 1, por lo que la luz viaja más lenta en la materia (Griffiths, 1999).

En óptica se sabe que el índice de refracción depende de la longitud de onda de la onda electromagnética (**Figura 46**) (Griffiths, 1999).

Figura 46. Cambio del índice de refracción respecto a la longitud de onda electromagnética para un vidrio.



(Griffiths, 1999)

Si se asume un comportamiento de la radiación en un medio no conductor, con un comportamiento en un medio gaseoso, se puede llegar a obtener la relación de la longitud de onda y el índice de refracción (Griffiths, 1999).

$$n = 1 + A \left(1 + \frac{B}{\lambda^2} \right)$$

La ecuación anterior corresponde a la fórmula de Cauchy: índice de refracción en función de la longitud de onda. A es el coeficiente de refracción y B es el coeficiente de dispersión.

En el caso de materiales conductores, la expresión del índice de refracción cambia. La función $\exp[i(\tilde{\mathbf{k}}x - \omega t)]$ describe las ondas moviéndose en un eje, en una dirección positiva, en donde $\tilde{\mathbf{k}}$ es el vector del número de onda de propagación o vector de propagación, ω es la frecuencia angular. De las ecuaciones de Maxwell, la permitividad eléctrica ϵ , la permeabilidad magnética μ y la ley de Ohm con conductividad σ , el vector de propagación $\tilde{\mathbf{k}}$ para un medio conductor (Griffiths, 1999):

$$\tilde{\mathbf{k}}^2 = \mu \epsilon \omega^2 + i \mu \sigma \omega, \text{ equivale a } \tilde{\mathbf{k}} = \mathbf{k} + i\mathbf{k}$$

$$\text{En donde } \mathbf{k} = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon \omega}\right)^2} + 1 \right]^{1/2} \text{ y } \mathbf{k} = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon \omega}\right)^2} - 1 \right]^{1/2}.$$

La parte imaginaria corresponde a la atenuación de la onda (un aumento en la amplitud con el aumento de x). Mientras que la parte real determina la longitud de onda, la velocidad de propagación y el índice de refracción de la forma usual (Griffiths, 1999).

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}, \quad v = \frac{\omega}{k}, \quad n = \frac{ck}{\omega}$$

Relación de longitud de onda, velocidad de propagación e índice de refracción respecto la parte real del vector de propagación.

B. Reflexión con incidencia oblicua.

La incidencia oblicua, es la incidencia de la onda electromagnética, en una superficie, a un ángulo θ_I definido. Parte de la energía de la radiación emitida sobre la superficie es reflejada y otra parte es transmitida. La onda incidente, reflejada y transmitida tienen la misma frecuencia angular ($\omega = kv$, k es el número de onda y v es la frecuencia), la cual es determinada por la fuente del haz de luz (Griffiths, 1999). Los vectores de propagación se encuentran relacionados mediante:

$$k_I v_1 = k_R v_1 = k_T v_2 = \omega \text{ ó } k_I = k_R = \frac{v_1}{v_2} k_T$$

Muestra la relación de número de onda de propagación y velocidad de la onda incidente

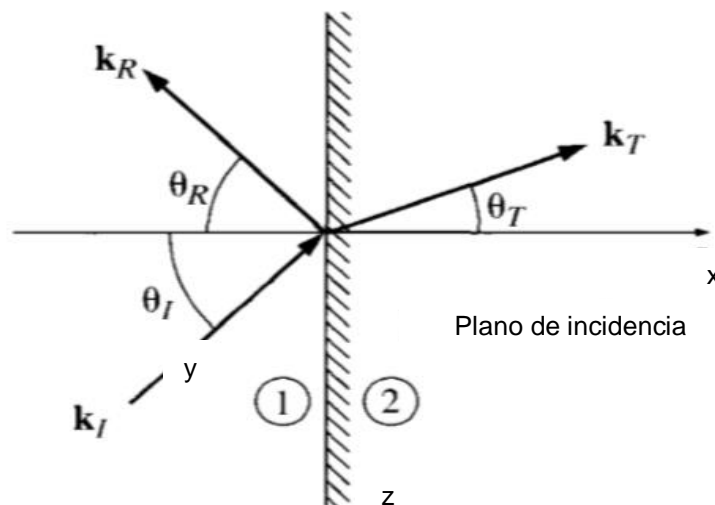
$$k_I v_1, \text{ reflejada } k_R v_1 \text{ y transmitida } k_T v_2.$$

$$\mathbf{k}_I \cdot \mathbf{r} = \mathbf{k}_R \cdot \mathbf{r} = \mathbf{k}_T \cdot \mathbf{r}, \text{ cuando } z = 0$$

Muestra la relación de número de onda de propagación y velocidad de la onda en términos espaciales.

Consecuentemente, se puede definir que los vectores de onda incidente, reflejada y transmitida forman un plano (llamado plano de incidencia, **Figura 47**), el que involucra la normal a la superficie (en el eje x) (Griffiths, 1999).

Figura 47. Plano de incidencia. En donde los números de onda y ángulos $k_I, \theta_I; k_R, \theta_R; k_T, \theta_T$ corresponden a las onda incidente, reflejada y transmitida respectivamente.



Si se toman los componentes vectoriales para x , cuando $y=0$, se puede decir que cada uno de los vectores se encuentran desplazados respecto al eje x , sinusoidalmente: $k_I \sin\theta_I = k_R \sin\theta_R = k_T \sin\theta_T$ (Griffiths, 1999). Se obtiene que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión:

$$\theta_I = \theta_R.$$

En el caso del ángulo de la onda transmitida, se obtiene:

$$\frac{\sin\theta_T}{\sin\theta_I} = \frac{n_1}{n_2}$$

Para definir la proporción de reflexión de luz de una superficie, se utiliza el coeficiente de reflexión que corresponde a la razón entre la intensidad reflejada y la intensidad incidente (Ecuación 20) (Griffiths, 1999).

$$R = \frac{I_R}{I_I}$$

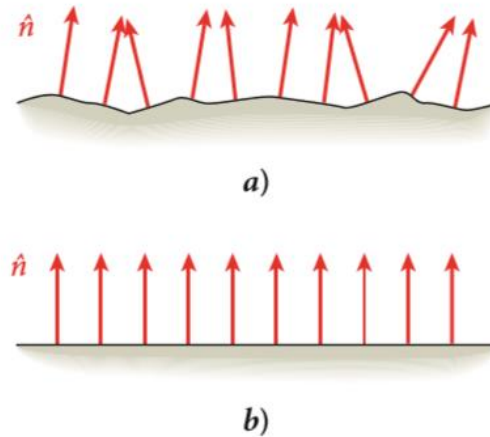
Para conocer la proporción de la luz transmitida en el medio, se utiliza el coeficiente de transmisión, el cual es la razón de la intensidad de radiación transmitida y la intensidad de radiación incidente (Griffiths, 1999).

$$T = \frac{I_T}{I_I}$$

Estos coeficientes miden la fracción de la energía incidente que es reflejada y transmitida, las cuales por conservación de la energía requieren que sea: $R + T = 1$ (Griffiths, 1999).

1. Reflexión especular y difusa. En la reflexión difusa la radiación electromagnética, incidente en la superficie del objeto, es dispersada aleatoriamente. En la reflexión especular las ondas electromagnéticas son reflejadas en el mismo sentido. La diferencia entre la reflexión difusa y especular radica en la rugosidad de la superficie y en la escala de la longitud de onda de haz de luz. Para una superficie con una reflexión especular, los vectores normales a la superficie están alineados (**Figura 48, b**), a diferencia de la variabilidad en una superficie difusa (**Figura 48, a**) (Bauer y Westfall, 2011).

Figura 48. Orientación de los vectores normales de superficie para una muestra con a) reflexión difusa y b) reflexión especular



(Bauer y Westfall, 2011)

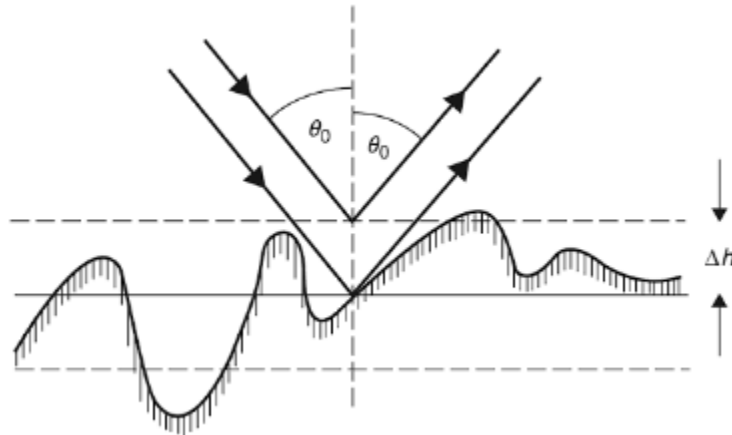
C. Criterio de Rugosidad de Rayleigh

La radiación al ser incidente en una superficie irregular, a un ángulo θ_0 es dispersada especularmente de la misma a un mismo ángulo (**Figura 49**). Se consideran dos rayos: uno es dispersado del plano de referencia, y el otro de un plano a una altura Δh por encima del plano de referencia (Rees, 2013). Después de la dispersión, la diferencia de trayectoria entre estos dos rayos es $2\Delta h \cos \theta_0$, por lo que la diferencia de fase entre ellas es:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi\Delta h \cos \theta_0}{\lambda}$$

Que representa la diferencia de fase de ondas electromagnéticas antes y después de ser dispersado por el material. En donde, λ es la longitud de onda de la radiación.

Figura 49. Criterio de Rayleigh. La radiación es reflejada especularmente a un ángulo θ_0 desde la superficie de la cual la raíz cuadrada de la desviación de la altura es Δh . La diferencia de largo de los dos rayos es $2\Delta h \cos \theta_0$.



(Rees, 2013)

Si se deja que Δh sea la variación de la raíz cuadrada en la altura de la superficie, $\Delta\varphi$ se vuelve la variación en la fase de los rayos dispersados. Una superficie puede ser definida como lo suficientemente suave para dispersar y ser especular, si $\Delta\varphi$ es menos que un valor arbitrario definido del orden de un radian (Rees, 2013). El valor convencional es $\pi/2$, y es conocido como el criterio de Rayleigh. Por lo que para que la superficie sea suave, de acuerdo a este criterio:

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta_0}$$

En donde λ es la longitud de onda de la radiación.

Esta expresión muestra que para que una superficie sea efectivamente suave a una incidencia normal, las irregularidades deberán ser menores que $\lambda/8$ en altura. Por lo que, para que una superficie para dar una reflexión especular a longitudes de ondas ópticas ($\lambda = 0.5\mu\text{m}$), por lo que Δh deberá de ser menor a 60nm. Condición que solo puede ser alcanzada con materiales fabricados, como las hojas de vidrio o metales (Rees, 2013).

X. CONSTRUCCIÓN DEL DETECTOR Y ADQUISICIÓN DE DATOS

Durante la planeación y ejecución del presente Megaproyecto se siguieron dos metodologías: la metodología original, desarrollada por el equipo LAGO-UVG con base en la información inicial con la que se contaba, y la metodología final, desarrollada por la comunidad LAGO y adaptada por el equipo LAGO-UVG para el proyecto. Cabe mencionar el hecho que la metodología original resultó inviable por diversos factores que se mencionarán en breve. Se decidió seguir la metodología final dado a que ésta era más completa, se apegaba a los estándares de la comunidad LAGO y se adaptaba a los materiales y capacidades del equipo.

A. Metodología original

Una de las características de la comunidad LAGO es la implementación de varios detectores a lo largo del continente Americano, compensando la ausencia de un detector grande y en elevadas alturas con muchos detectores pequeños en un área extensa. Debido a estas características surgió la necesidad de construir detectores posiblemente en lugares remotos, con mayores alturas, para obtener mejores datos. Por lo tanto, se debe diseñar una alternativa de transmisión de datos desde el tanque detector hasta una computadora central. Para ello se optó por utilizar una Raspberry Pi junto el tanque detector encargada de adquirir los datos. El diseño del programa de Transferencia de Datos Raspberry-PC se dividió en dos partes: el programa ejecutado en la Raspberry Pi y el programa ejecutado en la computadora central. Se empleó un acercamiento de tipo Cliente/Servidor, en donde ambos utilizarán Network Sockets como forma de comunicación a distancia. El programa en la Raspberry se trabajó en lenguaje Python en el cual se implementará un Client Socket, quien abre conexiones bajo demanda y enviará paquetes de datos al Socket implementado en la PC. El programa en la PC se trabajó en el lenguaje Java. En esta parte se implementará un Server Socket quien recibirá constantemente los datos transmitidos por la Raspberry Pi y responderá un mensaje de confirmación de recepción correcta de los datos (momento en el que la Raspberry Pi dejará de retransmitir dicho paquete y procederá con el siguiente). (Kurose, J.F., 2012)

Posterior a la recepción, clasificación y análisis de los datos recibidos por el WCD se debe proceder a subir los datos al repositorio de la comunidad LAGO. El repositorio utilizado es DSpace, el cual se accede de una forma específica y configurando la máquina encargada adecuadamente. Trabajos previos indican ya se ha realizado este tipo de configuraciones, habiéndose realizado una Máquina Virtual configurada con los requerimientos para Acceso y Almacenamiento de datos en DSpace. Las características de la máquina que buscamos acceder son:

- a. IP: 192.168.5.150
- b. S.O.: Debian 7 (64 bits)
- c. GNOME Desktop
- d. HDD: 109 Gb
- e. RAM: 4 Gb

Dicha máquina cuenta con las siguientes herramientas instaladas:

- a. JDK 7
- b. Maven 2.2
- c. Ant 1.7
- d. Postgress 9 / Oracle
- e. Tomcat 7
- f. Entre otras... (Araujo, V., 2014)

Con base en las consideraciones anteriores se plantearon varios requerimientos para los sistemas de Almacenamiento y Envío, Transferencia y Análisis correspondientes al presente módulo del Megaproyecto. No obstante, el cumplimiento de varios de los requisitos planteados resultó inviable, afectando la aplicación de la metodología inicial.

La transferencia de los datos capturados de la Raspberry Pi a la Computadora mediante envío de mensajes no fue posible debido a la enorme cantidad de eventos detectados (el tamaño promedio de cada hora de datos es del orden de 10^2 Mb). Transferir constantemente esa cantidad de datos mediante Wi-Fi (posiblemente desde un lugar alejado) hubiera resultado en una pérdida de paquetes elevada debido a la saturación de la red y las fluctuaciones de sus servicios. Se consideró como alternativa el envío de datos

mediante GMS, dado presentaba ventajas sobre el Wi-Fi (como rango y disponibilidad). Se descartó dicha alternativa dado el costo monetario de transferir esa cantidad de datos era muy elevado.

El acceso a la Máquina Virtual mencionada en el trabajo de Victor Araujo no fue posible luego de varios intentos por obtenerla y recuperarla. Se comenzó por ubicar el servidor en donde residía dicha Máquina Virtual, identificándolo como el servidor ubicado en el aula J-205 de la Universidad (Laboratorio Avanzado de Computación). Para poder acceder al contenido del servidor fue necesario utilizar la el hipervisor de VMWare: VSphere. Con ésta herramienta se puede obtener acceso remoto a máquinas virtuales con facilidad. Una vez preparados los requerimientos para el acceso se encontró la dificultad de obtención de la contraseña y usuario del servidor. Para ello se consultó a varias personas del Departamento de Computación, miembros de la Asociación de Estudiantes de Computación e incluso exalumnos de la Unversidad que pertenecieron a la carrera de Computación y también a la Asociación de Estudiantes (la encargada del custodio de las credenciales). Luego de muchos intentos y consultas no se logró obtener la contraseña para el acceso a la máquina virtual y a ninguna parte del servidor del Laboratorio Avanzado. Se intentó además acceder físicamente al servidor, con la finalidad de recuperarlo, buscando obtener la contraseña o hash de la misma. Luego de varias pruebas de acceso y penetración no fue posible lograr entrar al servidor, por lo que finalmente se cesó el intento por acceder a la máquina virtual.

Los factores mencionados anteriormente afectaron seriamente el diseño del Megaproyecto, dado que una de las finalidades era unirnos a la comunidad LAGO aportando nuestros datos. Sin la Máquina Virtual como opción para envío de los datos se debería implementar una alternativa propia, o bien realizar nuevamente el trabajo de graduación de Victor Araujo (desviándonos de los objetivos del Megaproyecto). La metodología del Megaproyecto debió ser rediseñada drásticamente; afortunadamente se obtuvo ayuda de un miembro importante de la comunidad que permitió realizar e implementar el detector a tiempo.

B. Metodología final

Para la semana entre el 18 y 25 de junio se contó con la visita de Horacio Arnaldi, director de Ingeniería electrónica de LAGO miembro de la comunidad LAGO de Bariloche, Argentina. Durante su visita impartió un curso a los miembros de la comunidad LAGO-UVG respecto a la implementación de un WCD. De estas clases impartidas es que se desarrolló la metodología final que se empleó en la construcción del Detector. Aprovechando la visita, el Ing. Arnaldi trajo consigo un PMT Photonis XP1802 y una placa digitalizadora donados por la comunidad LAGO; elementos necesarios para armar el detector. Además, se contó con la donación de una NEXYS 2 (otro elemento fundamental) de parte del Ing. Luis Arceo de la comunidad LAGO-México. Con los fondos recaudados por LAGO-UVG se compró un segundo fototubo de marca Hamamatsu R5912-20, designado para la construcción de un segundo detector con la nueva electrónica de LAGO (descrita en breve).

Figura 50. Visita de Horacio Arnaldi a la UVG. De izquierda a derecha: Karen Guarcax, Luis Mijangos, Luis José Pinillos, Horacio Arnaldi (LAGO Bariloche), Miguel Novella, Daniel Conde y Pablo Duque.



1. Instalación del WCD "K'inich Ahau". La construcción del WCD para la comunidad LAGO-UVG se realizó siguiendo los lineamientos expuestos en la

Metodología, con la finalidad de apegarse a los estándares y formatos utilizados por la comunidad en general. La construcción se realizó la semana entre el 18 y 25 de Junio en la cual se contó con la visita del Ing. Horacio Arnaldi de la comunidad LAGO-Bariloche, contando con la asistencia profesional de un conocedor del campo. A cada detector de la comunidad se le debe brindar un nombre con la finalidad de identificar la procedencia de los datos; el WCD implementado en la UVG se bautizó con el nombre de Kinich Ahau, haciendo alusión al Dios Maya del Sol.

Se inició con la preparación del tanque y el interior reflejante. El tanque consiste en un contenedor Rotoplast de 1500 litros, con 1.2 m de altura y 0.8 m de diámetro. Luego se realizó una estructura con tubos de PVC diseñada para colocarse dentro del tanque, funcionando como contorno sobre el cual envolver el cobertor fabricado con *Tyvek*. En paralelo se trabajó en la adaptación de la tapadera del tanque para poder contener el PMT y su base. Una vez terminados estas dos partes se procedió a ubicar el tanque en su posición final e iniciar su llenado con agua. Además, se recubrió el tanque por fuera con un cobertor reflejante negro, para evitar el ingreso de luminosidad del ambiente que pudiera afectar la detección. Terminado esto el tanque se encuentra listo para iniciar su funcionamiento.

Figura 51. Tanque de polietileno, de 600L marca Talishte utilizado como base del detector



Como siguiente punto fue necesario instalar el sistema ACQUA para recepción de pulsos en una computadora designada para la tarea. El Departamento de Física designó

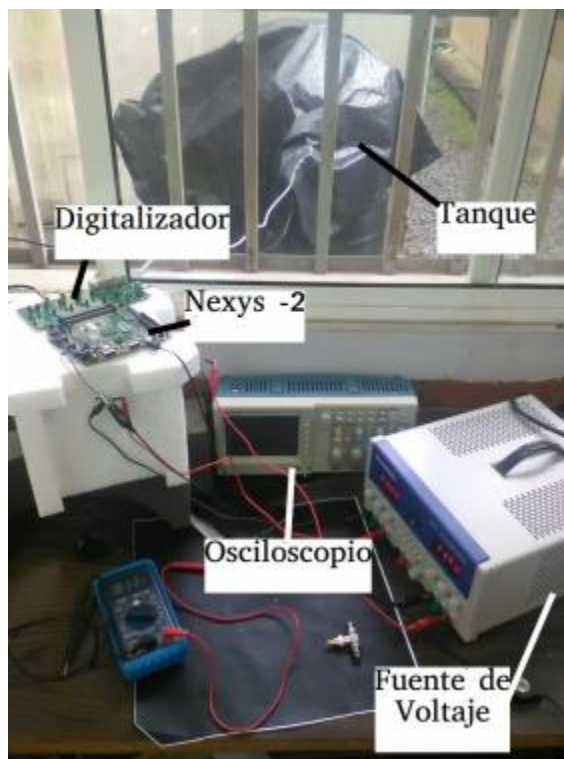
una computadora del laboratorio C-112 para el uso por LAGO-UVG (Dell Precision T1700 con Ubuntu 14.02). Para la instalación de ACQUA se siguieron los procedimientos expuestos obtenidos de la Wiki y Guía Oficial de LAGO, tanto para la instalación en la computadora como para las pruebas realizadas en la Raspberry Pi.

Para las pruebas del presente Megaproyecto se realizaron varias tomas de eventos en las fechas: 23 de agosto (11 horas), 23 de septiembre (66 horas), 5 de octubre (3 horas) y 8 de octubre (21 horas). Los resultados más importantes son los correspondientes a los eventos del 23 de agosto y el 8 de octubre. La peculiaridad de ambas fechas es que cada una se realizó con distintos tipos de agua en el tanque (correspondiente al módulo de Química); la primera con agua del servicio público y la segunda con agua tratada de forma especial. Con el agua tratada se buscaba eliminar la presencia de microorganismos que afecten los pulsos detectados sin modificar las propiedades de absorción de la misma. También se presentan los resultados probados con la Raspberry Pi (2 horas) realizado el 11 de agosto. Los demás eventos capturados se exponen en la Discusión en donde se analiza las posibles causas de los errores que afectaron a estos datos.

2. Adquisición. Como parte de la nueva metodología se siguieron los lineamientos especificados por la comunidad LAGO para el diseño de la electrónica del detector. La Base del PMT es el primero de estos componentes, y está encargada de recibir los pulsos provenientes del fototubo. Dichas bases, al igual que los fototubos de la comunidad LAGO, fueron rescatados del observatorio Pierre Auger. El componente más importante de las bases es la fuente EMCO capaz de producir una salida de 2000 V., el cual alimenta al PMT. Luego, los pulsos emitidos por el fototubo son transmitidos al siguiente componente: la Placa Digitalizadora. Esa placa puede digitalizar simultáneamente hasta tres canales de pulsos, pudiendo soportar esa misma cantidad de detectores. La digitalización la realiza con 10 bits a 40 millones de muestras por segundo (Msps), por lo que cada segundo se generan 50 Mb de información discretizada. Esa información es transmitida a la placa NEXYS-2: el kit de desarrollo de FPGA utilizado por la comunidad LAGO para la discriminación de pulsos. Esto se realiza dado que la mayoría de pulsos capturados son ruido, como se ha mencionado anteriormente. Por último, la transmisión

de los eventos a la computadora receptora se hace mediante un conector USB mini. (Sofo Haro, Miguel, 2011)

Figura 52. El detector K'inich Ahau, mostrando el tanque y el sistema de digitalización



Una vez digitalizados y discriminados los pulsos del PMT se puede proceder a adquirirlos y almacenarlos en la computadora receptora. El proyecto LAGO cuenta con un sistema de adquisición de datos integrados denominado ACQUA. Dicho sistema cuenta con los códigos de adquisición para las diferentes electrónicas de adquisición implementadas por la comunidad. Para la obtención de ACQUA se siguieron las especificaciones de la Wiki oficial del Proyecto LAGO, optando por utilizar un sistema Debian debido a su facilidad de configuración y para apearse al estándar de la comunidad. Se inició instalando los requisitos necesarios para el correcto funcionamiento del paquete ACQUA:

- a. Gcc complete
- b. Make
- c. Screen

- d. Small device C compiler cc1111
- e. Libusb

Mediante la ejecución del siguiente comando:

```
sudo apt-get install build-essential screen libusb-dev cc1111
```

El siguiente paso sería obtener la última versión del sistema ACQUA, mediante la clonación del repositorio oficial con el siguiente comando:

```
sudo git clone https://github.com/lagoproject/acqua.git
```

Una vez se ha descargado y descomprimido el paquete ACQUA es necesario realizar las configuraciones para la adquisición específicas para cada sitio. Para ello, LAGO ha adoptado un sistema de metadatos de autoingestión basados en el protocolo RSA de 2048 bits con una combinación de llaves pública y privada. Es necesario obtener primero un usuario y contraseña de parte del Responsable del Grupo de Datos, para poder transmitir los datos al repositorio central en Colombia. Dicho usuario obtenido cuenta únicamente con acceso a los protocolos SCP, SFTP y RSYNC, permitiendo copiar y transferir los datos y metadatos generados, pero no ingresar ni navegar dentro del repositorio central.

Para facilitar y uniformizar la información generada ACQUA cuenta con el script *lago-configs.pl*, el cual realiza una serie de preguntas que sirven para configurar la adquisición con base en las características propias de cada detector. Al finalizar la configuración, se crea un archivo que contiene los aspectos ingresados. También se crea un archivo Crontab, encargado de ejecutar periódicamente los comandos necesarios para la adquisición, compresión, análisis y transferencia de datos. En la versión actual del sistema ACQUA las preguntas requeridas para la configuración son:

- a. Datos del sistema (Variable de entorno del directorio de adquisición)
- b. Datos del sitio (Nombre, coordenadas y altitud, datos del responsable del sitio, institución y cantidad de detectores)
- c. Datos de los detectores (Nombre, dimensiones, recubrimiento interno, modelo del PMT)

- d. Datos de calibración (voltajes y niveles de trigger o disparo de cada detector)
- e. Datos de adquisición (modelo de FPGA, modo de almacenamiento y transferencia)
- f. Datos de sensores (GPS, presión y temperatura)
- g. Datos de Transferencia (transferencia automática habilitada, intervalo de transferencia, usuario en el repositorio, etc.)

Como se puede observar, en esta configuración se debe ingresar además el usuario y contraseña obtenidos para automatizar el proceso de almacenamiento de los datos. Estas variables son utilizadas extensamente por ACQUA, tanto al momento de la adquisición de eventos (voltaje, trigger, etc.) como referencia para los demás miembros de la comunidad que utilicen los datos generados (especificaciones del detector, ubicación, etc.).

Para finalizar, es necesario compilar el sistema de adquisición. Para ello, se aprovecha la configuración y variables de entorno ingresadas utilizando los siguientes comandos:

```
cd $LAGO_DAQ; make
```

Una vez finalizada la compilación se puede verificar la correcta instalación de ACQUA ejecutando el siguiente comando:

```
./lago -v
```

En este momento se debe desplegar información sobre la versión del sistema instalado (la versión más reciente al momento de la redacción del presente proyecto era la 5). Logrado esto la computadora ya se encuentra lista para adquirir y transferir datos capturados. Ahora el usuario puede interactuar con el sistema mediante el uso de los comandos *lago-start.sh* (el cual configura la NEXYS, modifica el crontab y verifica la correcta adquisición de los datos, volviendo a lanzarla en caso de ser necesario o posterior a una recuperación de una falla eléctrica) y *lago-stop.sh* (deteniendo la

adquisición y modificando el crontab para detener la ejecución periódica de la adquisición). (LAGO Wiki, 2016)

Además, de los dos comandos mencionados, ACQUA cuenta con otros más específicos que permiten realizar operaciones básicas para el manejo y obtención de datos. El procedimiento para encender el equipo es el siguiente:

a. Establecer el voltaje de la fuente en 12 V y una corriente de 1 Amp. Revisar la correcta conexión a los pines de la NEXYS (tierra y voltaje).

b. Revisar que el PMT esté desconectado y la NEXYS con los jumpers como deben estar (posición WALL). Conectar la NEXYS a la computadora vía USB.

c. Cargar el esquemático requerido por la NEXYS que la programa para la discriminación y recepción de pulsos. Debe tenerse cuidado de elegir el archivo correcto, ya que de ello dependerá lo que pueda hacer la NEXYS. Se utiliza el comando:

.lago -x <archivo_esquematico.xsvf>

d. Revisar la conexión exitosa entre la FPGA y la computadora mediante los comandos:

.lago -a (estado de registros)

.lago -t (temperatura y presión)

.lago -g (gps)

e. Una vez se obtenga una conexión exitosa con la computadora se puede conectar el PMT a la placa digitalizadora. Además, se sugiere conectarlo a un osciloscopio para luego establecer un voltaje y poder observar los pulsos recibidos. Para indicar los voltajes y niveles de disparo (trigger) se utiliza el siguiente comando (reemplazando el nombre de registro por *hvX* y la cantidad por un número – v. gr. *1000*, donde X es el número de canal al cual se conectó el detector):

.lago -s <nombre de registro> <cantidad>

Para iniciar una adquisición de forma manual en modo de prueba basta con ejecutar el comando:

.lago -f <nombre_de_archivo.dat>

Lo que resultará en la creación de un archivo con el nombre especificado con todos los eventos recibidos y discriminados. Para detener la adquisición se debe terminar el proceso mediante el comando *CTRL + C* u otras alternativas.

Finalmente, el procedimiento para apagar el detector y electrónica de forma adecuada es el siguiente:

- a. Establecer el voltaje del canal correspondiente en 0 V mediante el comando:

./lago -s hvX 0
- b. Desconectar el PMT de la placa digitalizadora. Desconectar el conector de la base del PMT.
- c. Apagar la FPGA. Desconectar el cable de poder de la FPGA. Apagar la fuente de poder.

(Asorey, H.G., Gómez B., M., 2011)

La instalación del sistema ACQUA para recepción de datos también puede realizarse en una Raspberry Pi, permitiendo adquirir datos en un dispositivo de menor tamaño y poder implementar detectores en lugares alejados. Cabe mencionarse que la Raspberry Pi debe contar con acceso a internet, de lo contrario no será posible la transferencia de datos al repositorio y se podrán recuperar los datos únicamente accediendo de forma física el detector.

El sistema operativo de la Raspberry debe configurarse previo a su conexión con la FPGA y la recepción de pulsos. Se deben instalar los programas:

- a. bash
- b. perl
- c. rsync
- d. ntp
- e. bzip2
- f. git (opcional pero recomendado)

ejecutando el comando:

```
sudo apt-get install screen bzip2 rsync git ntp
```

Luego se debe crear un usuario con nombre “lago” para uniformizar los distintos sitios de la comunidad. Además, se le debe brindar accesos de superusuario con los siguientes comandos:

```
sudo adduser lago
```

```
sudo visudo
```

y agregar luego del usuario “pi” la línea:

```
lago ALL=(ALL) NOPASSWD: ALL
```

También se puede configurar el *daemon* NTP, para sincronización de la adquisición, y otorgar permisos a los dispositivos marca Diligent (el fabricante de la NEXYS 2) para evitar el uso de *root*. Dichos procedimientos se especifican en la Wiki Oficial del proyecto.

Una vez finalizadas las preparaciones de la Raspberry Pi se termina instalando el sistema ACQUA clonando el repositorio oficial, de igual manera a como se realiza en una PC. En caso de no poder instalar o compilar el sistema una alternativa es instalar las funcionalidades necesarias ejecutando el siguiente código:

```
sudo apt-get update (Actualizar la Raspberry y la fecha)
```

```
sudo apt-get upgrade
```

```
sudo dpkg-reconfigure
```

```
sudo apt-get install g++ mercurial vim gnuplot-x11 /  
cc1111 libusb-dev libusb-1.0-0-dev screen (Instalar dependencias)
```

```
sudo chmod 777 -R /root/ (Otorgar permisos)
```

```
cd /root/
```

```
sudo mkdir desarrollo (Crear ambiente de desarrollo)
```

```
cd desarrollo
```

```
sudo hg clone https://lago@bitbucket.org/lago/libfpga (Descargar)
```

```

sudo hg clone https://lago@bitbucket.org/lago/lago-daq
sudo nano /home/pi/.bashrc (escribiendo al final:)
    export MAKESTUFF=$HOME/desarrollo/libfpga/makestuff
source /home/pi/.bashrc (Reiniciar bashrc)
cd libfpga ; make      (Compilar ambas descargas)
cd lago-daq ; make
sudo ./lago -h        (Probar correcto funcionamiento)

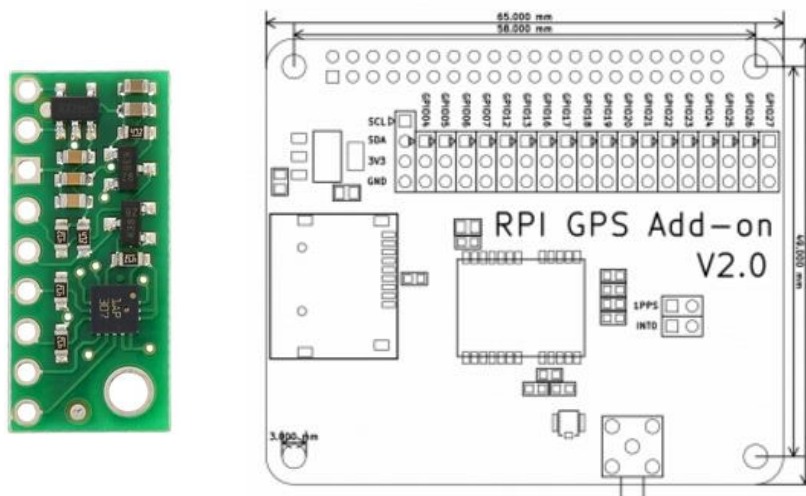
```

(Peña R., Jesús, 2012)

Los elementos instalados son las funcionalidades básicas del sistema ACQUA, consistiendo esencialmente del comando *lago* y sus respectivas opciones que permiten capturar pulsos y generar los archivos correspondientes. No se está instalando las funcionalidades de análisis de los datos, así como tampoco la automatización de los procesos de adquisición y transferencia mediante el uso de *lago-configs.pl* y los comandos *lago-start.sh* y *lago-stop.sh*.

La electrónica LAGO cuenta también con un sistema GPS y un módulo de Presión y Temperatura; datos necesarios para el almacenamiento y análisis de los pulsos capturados. No se pudo obtener los módulos utilizados por la comunidad LAGO, por lo que se optó como alternativa el uso de una Raspberry Pi para la implementación de ambos sistemas. Para ello se adquirieron dos componentes adicionales: El módulo *RPI GPS Add-on V2.0*, el cual se comunica mediante el puerto serial de la Raspberry Pi transmitiendo información como coordenadas, hora, etc. y el componente *LPS331AP MEMS pressure sensor* de STMicroelectronics, el cual brinda la presión y temperatura mediante el puerto serial con el protocolo I2C. Con estos componentes se procedió a diseñar un programa que se encargue de monitorear constantemente esos factores (coordenadas, presión, temperatura y hora) y posteriormente añadirlos a los archivos generados por ACQUA y también almacenarlos independientemente. Una vez se tengan modificados adecuadamente los archivos de pulsos capturados se puede proceder a transferir al repositorio central en Colombia.

Figura 53. Módulo de presión y temperatura y módulo GPS utilizados



La implementación del sensor de Presión y Temperatura fue designada para el módulo de Electrónica (encargado: Pablo Duque). El diseño e implementación del módulo GPS fue designado al presente módulo, para el cual se siguieron los pasos basados en una implementación del mismo componente. (Causar, M., 2014)

Primero se preparó el puerto UART (serial) para el uso del módulo GPS, ya que por defecto éste es utilizado por Linux para iniciar sesión y depuración de kernel y puede contener tráfico de mensajes que afecten al componente. Para ello se deshabilitaron estas opciones modificando el archivo de inicio (boot) de la Raspberry Pi. Se recomienda obtener una copia de seguridad del sistema operativo antes de realizar las modificaciones, ya que un error puede ocasionar que el sistema no pueda iniciar nuevamente. Se aplicaron los siguientes comandos:

```
sudo nano /boot/cmdline.txt
```

modificando la línea:

```
dwc_otg.lpm_enable=0 console=ttyAMA0,115200 kgdboc=ttyAMA0,115200  
console=tty1 root=/dev/mmcblk0p2 rootfstype=ext4 elevator=deadline rootwait
```

por lo siguiente:

```
dwc_otg.lpm_enable=0 console=tty1 root=/dev/mmcblk0p2 rootfstype=ext4
elevator=deadline rootwait
```

Se debe modificar también el archivo `/etc/inittab` comentando la siguiente línea para evitar que se inicie sesión automáticamente:

```
T0:23:respawn:/sbin/getty -L ttyAMA0 115200 vt100
```

Finalmente se debe reiniciar la Raspberry Pi para que los cambios tomen efecto. Una vez realizado correctamente las configuraciones anteriores se continúa instalando el demonio GPSD (Global Positioning System Daemon), el cual se comunicará con el componente para obtener su información. Se debe instalar el programa junto sus dependencias, correr el servicio y probar su funcionamiento de la siguiente manera:

```
sudo apt-get install gpsd gpsd-clients python-gps
sudo gpsd -F /var/run/gpsd.sock /dev/ttyAMA0
cgps -s
```

Si todo funcionó correctamente se deberá apreciar una interfaz similar a la siguiente:

Figura 54. Interfaz del módulo GPS funcionando

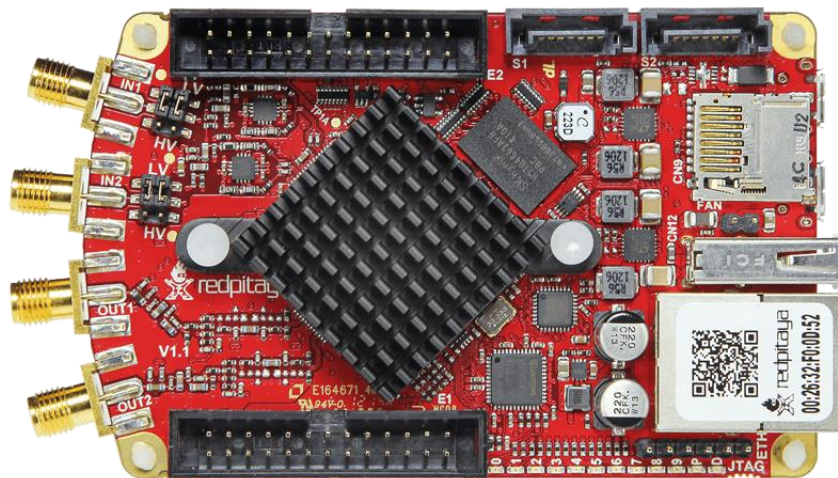
Time:	2014-05-20T15:37:00.000Z	PRN:	Elev:	Azim:	SNR:	Used:
Latitude:	33. S	1	09	067	24	Y
Longitude:	151. E	3	10	139	27	Y
Altitude:	130.7 m	5	09	067	24	Y
Speed:	0.3 kph	6	10	139	27	Y
Heading:	0.0 deg (true)	7	12	271	24	Y
Climb:	0.0 m/min	8	09	067	24	Y
Status:	3D FIX (11 secs)	9	10	139	27	Y
Longitude Err:	+/- 1 m	10	12	271	24	Y
Latitude Err:	+/- 2 m	11	01	130	00	Y
Altitude Err:	+/- 5 m	13	09	067	24	Y
Course Err:	n/a	17	10	139	27	Y
Speed Err:	+/- 14 kph	19	12	271	24	Y
Time offset:	0.243					
Grid Square:	QF56ng					

Para el diseño del programa que monitoree periódicamente los datos del GPS (Latitud, Longitud, Altitud, etc.) se decidió utilizar la funcionalidad `gpspipe` para

consumir la salida del módulo. Dicha funcionalidad es parte del demonio GPSD y entrega paquetes de datos provenientes del módulo GPS mediante el uso de *pipes*. De esta forma se logra obtener una enorme flexibilidad ya que cualquier implementación (en cualquier lenguaje) puede obtener datos de *gpspipe* independientemente de la forma en que fuera diseñado el programa.

Como parte de los objetivos se buscó intentar implementar un WCD utilizando una Red Pitaya como componente electrónico encargado de la adquisición de pulsos. La Red Pitaya es una tecnología de vanguardia especialmente diseñada para proyectos que requieren rápidas velocidades de procesamiento e involucran grandes cantidades de datos. Cumple los roles equivalentes de la tarjeta digitalizadora, la tarjeta FPGA (como la NEXYS 2) y la computadora receptora en la electrónica de LAGO, reduciendo considerablemente la cantidad de componentes utilizados y el costo de obtener los mismos (tiene un costo aproximado de \$300).

Figura 55. Vista superior de una Red Pitaya



La ventaja principal de utilizar la Red Pitaya es la mejora sustancial a la electrónica utilizada por la comunidad LAGO. Actualmente todas las versiones de electrónicas realizan la digitalización a 40 Msps con una resolución de 10 bits, como se mencionó anteriormente. La “desventaja” de estas velocidades es que se puede muestrear solamente en intervalos de 25 ns, hasta un máximo de 12 veces en un pulso que dure 300 ns (el promedio de los eventos). Ello ocasiona pérdida de información valiosa para la

clasificación y análisis de los eventos detectados (Teorema de Nyquist-Shannon). La Red Pitaya tiene la capacidad de digitalizar a 125 Msps con una resolución de 14 bits, pudiendo muestrear en intervalos de $1/125 \times 10^6 = 8$ nanosegundos. (Red Pitaya, 2015)

Esto se traduce en una mejora del 300% en la calidad de los pulsos capturados, lo cual beneficiaría enormemente el estudio de Rayos Cósmicos y sus aplicaciones. Es por ello que para el presente Megaproyecto se adquirió un segundo PMT, así como una Red Pitaya, anticipándose a la futura implementación de un segundo WCD con ésta nueva tecnología. Previo a la construcción del segundo detector se probará el funcionamiento de la Red Pitaya con los pulsos generados por el primer WCD implementado.

a. Ecosistema de Red Pitaya en PC Host. Para poder programar la FPGA de Red Pitaya se debe instalar el ecosistema de Red Pitaya en una PC con sistema operativo de Linux con versión de 64 bits. Se eligió trabajar primeramente en una computadora DELL PRECISION T1700 que se encontraba disponible en los laboratorios de física de la Universidad del Valle de Guatemala. Esta instalación no se pudo completar debido a problemas de compatibilidad con librerías de C, que son necesarias para generar el ecosistema.

Utilizando el foro de Red Pitaya para establecer el problema encontrado, se encontró que este problema era directo con la instalación de la computadora. Decidiendo instalar en una máquina virtual Ubuntu 14.04 de 64 bits para instalar dentro de ella el ecosistema de Red Pitaya. Se decidió utilizar VirtualBox para generar la máquina virtual y de esta manera poder utilizar Red Pitaya desde la misma. El primer paso debe ser descargar e instalar VirtualBox. Así mismo se debe descargar la imagen para poder cargar el sistema operativo a la máquina virtual. Se debe descargar la imagen mini.iso para Ubuntu 14.04 y una vez descargado iniciar VirtualBox. Se debe seleccionar la opción de crear una nueva máquina virtual apachando el botón nombrado Nuevo. En la siguiente ventana se debe seleccionar el nombre para la máquina, llamándola Patricio Rey. En esa misma ventana se pide que se ingrese el sistema operativo y su versión, por lo que se ingresa Linux y Ubuntu de 64 bits. El tamaño de la memoria se configuró para tener 4GB y luego de esto se selecciona la opción de crear un disco duro virtual, al salir la siguiente ventana se debe seleccionar VDI y elegir que sea dinámicamente asignada. El tamaño de la imagen del

disco duro se creó de 80GB para tener suficiente espacio y mínimo debe ser de 30GB ya que Vivado ocupa aproximadamente 10GB. En sistema se debe elegir únicamente CD/DVD y en almacenamiento elegir controlador IDE, haciendo click en el ícono de CD/DVD y seleccionando la ubicación de la imagen mini.iso descargada. Con esto se tendrá preparada la máquina virtual para la instalación de Ubuntu (Arnaldi, 2016).

Se prosiguió instalando Ubuntu cerciorándose que se tenga el desktop de Ubuntu seleccionado en la instalación. El proceso de instalación tarda unas horas y al finalizar se debe detener la máquina virtual. Se debe ir a configuración y en sistema seleccionar únicamente disco duro en la lista de orden de arranque. Al realizar esta acción la máquina virtual estará lista para usarse (Arnaldi, 2016).

Para instalar el ecosistema de Red Pitaya se deben instalar una serie de dependencias en Ubuntu 14.04. Para instalar estas dependencias se debe escribir los siguientes comandos en la terminal de Ubuntu (Red Pitaya, n/a):

```
sudo apt-get install make curl xz-utils  
sudo apt-get install libssl-dev device-tree-compiler u-boot-tools  
sudo apt-get install schroot  
sudo apt-get install qemu qemu-user qemu-user-static  
sudo apt-get install lib32z1 lib32ncurses5 lib32bz2-1.0 lib32stdc++6
```

Las últimas librerías que se deben instalar corresponden a librerías de 32 bits y por lo general la librería lib32bz2-1.0 no se encuentra y al ejecutar el comando de instalación lanzará el siguiente error:

Figura 56. Error que muestra la terminal de comandos de Linux al no poder instalar la librería lib32bz2-1.0.

```
E: Unable to locate package lib32bz2-1.0  
E: Couldn't find any package by glob 'lib32bz2-1.0'  
E: Couldn't find any package by regex 'lib32bz2-1.0'
```

Al encontrarse con ese error se debe conseguir una librería alternativa, para la cual se debe ingresar en la terminal de comandos lo siguiente:

```
sudo apt-get install lib32z1 lib32ncurses5 lib32stdc++6  
sudo dpkg --add-architecture i386  
sudo apt-get update  
sudo apt-get install libbz2-1.0:i386
```

Al obtener todas estas librerías, se contará con todos los requisitos necesarios para instalar el ecosistema de Red Pitaya. El último paso previo a empezar la instalación de Red Pitaya es la instalación de Vivado HLS. Para obtener Vivado HLS se debe ingresar a la página de Xilinx y descargar Vivado 2016.2 para la versión de Linux. Al descargar el archivo comprimido, se debe ingresar en la terminal los siguientes comandos para correr el ejecutable de la instalación (Arnaldi, 2016):

```
chmod +x Xilinx_Vivado_SDK_2016.2_0605_1_Lin64.bin  
sudo ./Xilinx_Vivado_SDK_2016.2_0605_1_Lin64.bin
```

Al correr estos comandos el instalador de Vivado aparecerá y se deben seguir los pasos que este solicita para instalarlo. El instalador pedirá que se inicie sesión con el usuario de Xilinx, por lo que se debe crear una cuenta en Xilinx previamente. Eventualmente se llegará a una ventana en la cual se debe seleccionar la edición de Vivado que se quiere instalar, se debe seleccionar Vivado HL Design Edition. Al oprimir el botón siguiente, se desplegará una lista de las librerías que se instalarán. En esta lista se debe tildar la opción Software Development Kit (SDK) y se debe destildar las opciones UltraScale y UltraScale+. Por último se debe seleccionar el directorio de instalación, en este se eligió guardar en el directorio predeterminado /opt/Xilinx. Al aceptar crear este directorio se empezará la instalación, y con esto al finalizar se podrá utilizar Vivado una vez activada la licencia del mismo (Arnaldi, 2016).

Una vez instalado Vivado se prosigue con la instalación del ecosistema. Red Pitaya utiliza gmake para compilar librerías y así armar su ecosistema para poder programar la FPGA, para habilitar el uso de gmake se debe crear un link al make que tiene Ubuntu. Esta acción se realiza con el siguiente comando (Red Pitaya, n/a):

```
sudo ln -s /usr/bin/make /usr/bin/gmake
```

Se prosigue clonando el repositorio proporcionado por Red Pitaya, haciéndolo con el siguiente comando (Red Pitaya, n/a):

```
git clone https://github.com/RedPitaya/RedPitaya.git
```

Al clonar el repositorio se creará una carpeta en el directorio en el que se decidió clonarlo llamada RedPitaya, se debe abrir esta carpeta y correr el archivo settings.sh, este archivo se debe correr siempre que se reinicie la computadora, a menos que se agregue a un bash. Este archivo realiza configuraciones necesarias para generar el ecosistema, dentro de ellas, correr el archivo settings64.sh de Vivado. Se debe revisar el archivo para verificar que los directorios de los archivos que desea configurar sean los adecuados, y al instalar todo en los directorios predeterminados, estarán en los directorios que trae configurados settings.sh. Para realizar esta acción se deben ingresar los siguientes comandos (Red Pitaya, n/a):

```
cd RedPitaya  
. settings.sh
```

Una vez ejecutado el script de configuraciones, se debe crear una carpeta que descargará varios archivos, ingresando los siguientes comandos (Red Pitaya, n/a):

```
mkdir -p dl  
export DL=$PWD/dl
```

Una vez creada la dirección se debe descargar la última versión de Ubuntu de la página de Red Pitaya utilizando el siguiente comando (Red Pitaya, n/a):

```
wget http://downloads.redpitaya.com/ubuntu/redpitaya?ubuntu-latest.tar.gz  
sudo chown root:root redpitaya_ubuntu-latest.tar.gz  
sudo chmod 664 redpitaya_ubuntu-latest.tar.gz
```

Se debe crear así mismo un archivo de configuración tipo schroot en el directorio `/etc/schroot/chroot.d/`, esto se realiza escribiendo el siguiente comando, ya que a la vez se desea escribir en el archivo (Red Pitaya, n/a):

```
sudo nano /etc/schroot/chroot.d/red-pitaya-ubuntu.conf
```

Este archivo debe contener la información de los usuarios que tendrán acceso a utilizar Red Pitaya, que en este caso es el usuario lago. Por lo tanto, la información contenida en el archivo está compuesta por las siguientes líneas (Red Pitaya, n/a):

```
[red-pitaya-ubuntu]  
description=Red Pitaya Debian/Ubuntu OS image  
type=file  
file=/home/lago/RedPitaya/redpitaya_ubuntu-latest.tar.gz  
users=lago  
root-users=lago  
permissions  
root-groups=root  
profile=desktop  
personality=Linux  
preserve-environment=true
```

Al escribir el archivo con esas líneas se debe asegurar de ingresar cada palabra y espacios, justo como se indica. Al terminar de escribir el archivo se debe salir presionando `Ctrl+X` y luego `Enter` para guardar el archivo. Una vez terminado el script se prosigue a compilar el ecosistema. Previo a la compilación se debe asegurar Ubuntu cuenta con las librerías `gcc-arm-linux-gnueabi` y `gcc-arm-linux-gnueabihf`. Para instalar estas librerías se debe ingresar los siguientes comandos (Red Pitaya, n/a):

```
sudo apt-get install gcc-arm-linux-gnueabi  
sudo apt-get install gcc-arm-linux-gnueabihf
```

```
sudo apt-get install gcc-arm-linux-gnueabi  
sudo apt-get install g++-arm-linux-gnueabi
```

Una vez instalados esta librería de cross compiladores, se prosigue a la compilación del ecosistema, ingresando el siguiente comando (Red Pitaya, n/a):

```
make -f Makefile.x86
```

Este comando compilará todo el ecosistema y por lo tanto toma varios minutos, configurará las conexiones la FPGA y dejará Vivado listo para utilizarse. Una vez terminado este proceso se debe realizar un schroot que utilizará el archivo de configuraciones que se creó anteriormente. Se debe ingresar en la terminal los siguientes comandos (Red Pitaya, n/a):

```
schroot -c red-pitaya-ubuntu <<- EOL_CHROOT  
make -f Makefile CROSS_COMPILE="" REVISION=$GIT_COMMIT_SHORT  
EOL_CHROOT
```

Una vez terminado se comprime el ecosistema utilizando el siguiente comando (Red Pitaya, n/a):

```
make -f Makefile.x85 zip
```

Al completarse la compresión, se completa la instalación del ecosistema y se podrá utilizar Vivado Design Suite para programar la FPGA Zynq incorporada en Red Pitaya. Luego de instalar el ecosistema de Red Pitaya se decidió utilizar Red Pitaya en lenguajes de alto nivel ya que esto facilitaría el uso del ADC de 125MHz, ya que se puede acceder a él con librerías en C, así como en Python. Para que la Red Pitaya pueda ser utilizada se debe acceder a ella por medio de el comando ssh, para esto se debe saber la dirección IP de la tarjeta adquirida. Se decidió utilizar un router con dirección IP 10.0.0.1 para

conectar la Red Pitaya con la computadora. La Red Pitaya adquirió la dirección IP 10.0.0.10, pudiendo comunicarse con ella con el siguiente comando:

```
ssh root@10.0.0.10
```

En seguida se pedirá la contraseña para acceder a la tarjeta Red Pitaya, la cual es root. Una vez ingresada se estará en la terminal de comandos de Red Pitaya.

Figura 57. Imagen de la terminal una vez se haya accedido a Red Pitaya.



El siguiente paso es clonar el repositorio de Red Pitaya de nuevo para que las librerías se encuentren en la Red Pitaya. Esto se debe realizar ingresando el siguiente comando:

```
git clone https://github.com/RedPitaya/RedPitaya.git
```

Al clonarse el repositorio, abrir la carpeta RedPitaya creada utilizando el siguiente comando:

```
cd RedPitaya
```

Luego dirigirse a la carpeta que contiene ejemplos de Python ya que en esta carpeta se encuentra el archivo redpitaya_scpi.py que es el sistema de comunicación utilizado para comunicarse con las librerías de Red Pitaya. Para realizar esta acción se debe ingresar el siguiente comando:

```
cd Examples/Python
```

Una vez ubicado en la carpeta se prosigue a iniciar la comunicación scpi, esto se realiza utilizando el siguiente comando:

```
systemctl start redpitaya_scpi &
```

De esta manera se iniciará la comunicación y al correr un archivo este logrará acceder a las librerías de Red Pitaya. El primer paso a seguir luego de activar la comunicación por scpi es probar el funcionamiento de los programas, por lo que se probó el programa `digital_led_blink.py` proporcionado por los desarrolladores de Red Pitaya para verificar si se logran ejecutar los programas. Para ejecutar un programa en Python se debe ingresar en la terminal el número de IP de la tarjeta Red Pitaya como argumento del programa y el número de LED que se desea que parpadee, queriendo que parpadee el LED0. Para ejecutar el ejemplo utilizar el siguiente comando:

```
python digital_led_blink.py 10.0.0.10 0
```

Una vez el LED0 de la tarjeta empiece a parpadear se determina que ya se puede utilizar la Red Pitaya con Python. Para escribir un programa en Python se debe tener en cuenta el API que relaciona los mensajes enviados con SCPI con las funciones en C. El API puede ser encontrado en la sección D en Anexos. Al estar trabajando en Python se llegó al problema que las librerías para este lenguaje de programación, no cuentan con la posibilidad de un *trigger* en los canales analógicos de alta frecuencia, ya que al programarlo nunca se detectaba un flanco y esto no permitía que la Red Pitaya fuese de utilidad, ya que se tendría que buscar muestra por muestra cuando sucedió un evento.

Al encontrarse con este problema se decidió migrar a C, ya que las librerías están escritas originalmente en este lenguaje, no teniendo que utilizar SCPI para programar. Antes de programar en C, se debe ejecutar el siguiente comando (Red Pitaya, n/a):

```
cat /opt/redpitaya/fpga/fpga_0.94.bit >/dev/xdevcfg
```

Este comando permite que se ejecuten efectivamente los programas en C, de lo contrario se encontrará un error de ejecución que no permitirá que se ejecute ningún programa. Una vez se ingresa el comando, se debe ingresar a la carpeta de ejemplos de C, para esto ingresar el comando (Red Pitaya, n/a):

```
cd /home/lago/RedPitaya/Examples/C
```

Una vez dentro de la carpeta se podrá programar en C, creando un archivo con el siguiente comando:

```
sudo nano test.c
```

Esto generará un archivo con la extensión de C llamado Prueba. Dentro del mismo se ingresa el código deseado para programar la Red Pitaya, tomando en cuenta las librerías para C que se encuentran en la Figura 128. Obtenido de (Red Pitaya, 2016). Funciones generales y de manipulación de puertos en C para Red Pitaya., Figura 129, Figura 130 y Figura 131 en la sección de anexos. Una vez creado el código, se guarda y se debe compilar. Para compilar el código se debe realizar un make del archivo sin la extensión de C, de la manera que se muestra en la siguiente línea que debe ser ingresada en la terminal de comandos (Red Pitaya, n/a):

```
make test
```

Este comando debe ser ejecutado exitosamente y de esta manera se asegurará que el programa esté libre de errores de sintaxis. Una vez compilado el programa se generará el ejecutable dentro de la carpeta, para ejecutar se debe ingresar el siguiente comando (Red Pitaya, n/a):

```
LD_LIBRARY_PATH=/opt/redpitaya/lib ./test
```

Cargando de esta manera el programa a la tarjeta, ejecutándolo y verificando su funcionamiento.

Para adquirir datos con el puerto analógico de alta frecuencia, se generó el código mostrado en la Figura 132, en la sección de anexos. Este código convierte la señal obtenida en canal analógico de alta frecuencia a una tasa de 125 MS/s. Se muestreará la señal una vez se pase el valor de umbral en un flanco negativo del pulso adquirido. Al pasar el flanco se le indica a la tarjeta que debe detener la adquisición 30 muestras luego de la activación del disparador. Una vez se detiene la adquisición, se obtiene la posición del puntero de escritura en el buffer del ADC en el momento en el que se activó el

disparador. Sabiendo la posición, se le piden datos al buffer desde 10 posiciones anteriores a la de la activación del disparador hasta 30 posiciones después de este, teniendo un total de 40 muestras por pulso. Esto se debe hacer cíclicamente para obtener pulsos hasta que el usuario elija detener la adquisición y los datos se graban en un archivo para luego poder graficarlos y analizar los datos.

Al digitalizar señales se debe tomar en cuenta la posición del jumper que define si la señal ingresada será de bajo voltaje o de alto voltaje, ya que si se define un bajo voltaje, todas las señales que sobrepasen los extremos (1V o -1V) saturarán al canal de adquisición. Mientras que las señales al configurar alto voltaje, pueden llegar a los 20V. Al implementar el código de adquisición y recibir señales del PMT, el funcionamiento del programa será el representado por diagrama de flujo encontrado en la Figura 133 en la sección de anexos.

XI. MÓDULO DE CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO

A. Metodología

1. Recursos materiales

Cuadro 6. Reactivos y materiales para cada etapa de la metodología del módulo.

Actividad	Reactivos y equipo
Prueba de jarras	<p><u>Reactivos</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua oxigenada al 30% grado industrial marca Quimiprova • ácido tricloro-iso-cianúrico grado industrial marca Quimiprova • Agua municipal • Bolsas plásticas de polietileno negro <p><u>Equipo</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Caja plástica de 60 x 42 x 30 cm marca Honz • Balanza marca Denver Instrument con un rango de 320±0.001g • Probeta marca Pyrex 50±0.05mL
Absorbancia: para prueba de jarras	<p><u>Reactivos</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua en jarras • Agua ultra-pura obtenida de Nano-Pure infinity. <p><u>Equipo</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Spectrometer Pasco modelo PS-2600 • 4 Beaker marca Kimax de 100mL • 4 cubetas plásticas de Spectrometer Pasco modelo PS-2600

Continuación Cuadro 6.

Actividad	Reactivos y equipo
Conductividad: para prueba de jarras	<p><u>Reactivos</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua en jarras • Agua ultra-pura obtenida de Nano-Pure infinity. <p><u>Equipo</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Advanced Chemistry Temperature Sensor marca Pasco PS-2153 • Advanced Chemistry Conductivity Sensor marca Pasco PS-2571 • PASPORT interface marca Pasco • SPARKlink PS-2009A • 3 Beakers marca Kimax de 100mL
Índice de refracción	<p><u>Reactivos</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua ultra-pura • Agua en el tanque del detector: tratada con Alumbre tipo B marca Quimiprova y con peróxido de hidrógeno al 30% grado industrial marca Quimiprova • Agua oxigenada al 30% grado industrial marca Quimiprova • ácido tricloro-iso-cianúrico grado industrial marca Quimiprova <p><u>Equipo</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Refractómetro de Abbe 3L marca Bausch & Lomb, con lámpara D-Sodio (589.3nm) • Balones de 10 ±0.02mL • Balanza marca Denver Instrument con un rango de 320±0.001g • Pipetas pasteur • Paños Kimwipes Kimtech Science marca Kimberly-Clark Profesional.

Continuación Cuadro 6.

Actividad	Reactivos y equipo
Reflectividad de Tyvek en agua: para prueba de jarras	<p data-bbox="444 363 574 394"><u>Reactivos</u></p> <ul data-bbox="561 422 1437 674" style="list-style-type: none"> • Agua en jarras • Agua ultra-pura obtenida de Nano-Pure infinity. • Agua en el tanque del detector: tratada con Alumbre tipo B marca Quimiprova y con peróxido de hidrógeno al 30% grado industrial marca Quimiprova <p data-bbox="444 699 542 730"><u>Equipo</u></p> <ul data-bbox="561 753 1437 1402" style="list-style-type: none"> • PASPORT Light Sensor marca Pasco modelo PS-2106^a, con resolución del 0.01% y respuesta espectral entre 320nm-1100nm. • Tyvek marca Dupont ® • Basic Optics Diode Laser marca Pasco modelo OS-8525A a una longitud de onda 650±10nm con una fuente de potencia de 9 V (incluida). • 2 rieles marca Pasco • Rotary Motion Sensor marca Pasco • Ray Table marca Pasco • Universal Interface 850 marca Pasco • Prisma marca Pasco

Continuación Cuadro 6.

Actividad	Reactivos y equipo
Proporción de Sulfato de aluminio	<p data-bbox="488 415 618 447"><u>Reactivos</u></p> <ul data-bbox="602 470 1235 562" style="list-style-type: none"><li data-bbox="602 470 1235 506">• Sulfato de aluminio tipo B marca Quimiprova<li data-bbox="602 527 857 562">• Agua municipal <p data-bbox="488 583 586 615"><u>Equipo</u></p> <ul data-bbox="602 638 1511 1010" style="list-style-type: none"><li data-bbox="602 638 1511 674">• Balanza marca Denver Instrument con un rango de 320 ± 0.001g<li data-bbox="602 695 1511 787">• Turbidímetro portátil modelo HI 98703 marca Hanna Instruments con un rango de detección $0-750 \pm 0.02$NTU.<li data-bbox="602 808 1333 844">• Tanque bicapa de polietileno de 600L marca Talishte<li data-bbox="602 865 1382 900">• Advanced Chemistry pH Electrode marca Pasco PS-2573<li data-bbox="602 921 1081 957">• PASPORT interface marca Pasco<li data-bbox="602 978 943 1014">• SPARKlink PS-2009A

Continuación Cuadro 6.

Actividad	Reactivos y equipo
Kinich Ahau: Detector de Radiación Vavilov-Cherenkov	<p>Reactivos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sulfato de aluminio tipo B marca Quimiprova • ácido tricloro-iso-cianúrico grado industrial marca Quimiprova • Peróxido de hidrógeno al 30% grado industrial marca Quimiprova • Agua municipal <p>Equipo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fotomultiplicador Hamamatsu Photonics • 2 Tanques bicapa de polietileno de 600L marca Talishte • Vinilo de fibra de carbono DI-NOC marca 3M • Balanza marca Denver Instrument con un rango de $320 \pm 0.001g$ • Probeta de $1000 \pm 5L$ marca Pyrex • Tyvek marca Dupont ® • Tubos de PVC • Codos de PVC • Uniones T • Hilo de algodón blanco • FPGA (Nexys) • Osciloscopio marca Tektronix modelo TDS 2012B

2. Sitio de estudio. Campus Central de la Universidad del Valle de Guatemala

3. Diseño, enfoque y tipo de investigación. Diseño experimental de tipo pre-experimental con enfoque cuantitativo.

4. Descripción de variables

Cuadro 7. Conceptualización y operacionalización de variables

Variable	Definición	Naturaleza	Nivel de medición	Codificación
Intensidad de luminosa I (lx)	Relación entre el flujo luminoso y la superficie iluminada.	Cuantitativa	De razón	Aprox. 270 lx (max. de detección de sensor) Dependerá de la intensidad de la irradiación del láser y la atenuación del medio.
Conductividad σ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Capacidad del medio de transmitir una corriente eléctrica. A medida que aumenta la concentración de materiales conductores en el medio, aumenta su conductividad.	Cuantitativa	De razón	Dependerá de la cantidad de electrolitos en el agua. Aprox. 0 –1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Continuación Cuadro 7.

Variable	Definición	Naturaleza	Nivel de medición	Codificación
Índice de refracción (n)	<p>Medida de la magnitud de la interacción de la radiación electromagnética con el medio que atraviesa. Se define como:</p> $n = \frac{c}{v}$ <p>En donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz en el medio.</p>	Cuantitativa	De razón	<p>El índice de refracción del vacío es 1.000, el índice de refracción del aire 1.00029. Dependerá del medio en el que atraviese la luz.</p>
Ángulo de reflexión	<p>ángulo de la luz reflejada en la superficie reflectante.</p>	Cuantitativa	De razón	<p>Este será dependiente del ángulo de incidencia.</p>

Continuación Cuadro 7.

Variable	Definición	Naturaleza	Nivel de medición	Codificación
Absorbancia	La ley de absorción, también conocida como Ley de Beer-Lambert, es la forma de medición cuantitativa de la dependencia del grado de atenuación según la concentración de las moléculas absorbentes y la longitud del trayecto en el que ocurre la absorción. Al momento que la luz pasa por un medio que contiene un analito absorbente, ocurre una disminución en la intensidad del haz de luz, a causa de la excitación de las moléculas.	Cuantitativa	De razón	Las absorbancias serán medidas de 379.940nm a 950.206nm. Se espera un rango de absorbancia máximo de 0.5.
Ángulo de incidencia	Ángulo en el que la fuente de luz es emitida sobre la superficie.	Cuantitativa	De razón	Será definido entre 30°-60°
Coefficiente de reflexión	Razón entre la intensidad reflejada y la intensidad incidente de radiación sobre una superficie. $R = I_R/I_I$	Cuantitativa	De razón	Se espera un coeficiente de reflectividad del Tyvek del 90%

Continuación Cuadro 7.

Variable	Definición	Naturaleza	Nivel de medición	Codificación
Turbidez (NTU)	La turbidez es la dificultad del agua para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos	Cuantitativa	De razón	Por ser agua municipal se espera una turbidez inicial menor a 1 NTU.
Cuentas ADC de pico ADC_p	Mide la magnitud correspondiente al valor de salida del conversor FADC (Conversor analógico digital tipo Flash, por sus siglas en inglés), con un rango entre 0 y $(2^{10} - 1) = 1023$ cuentas ADC_p correspondiente a un rango de entrada entre 0-2 V; lo cual establece la equivalencia: $1 ADC_p = \frac{2V}{2^{10}} = 1.95 mV$	Cuantitativa	De razón	Dependerá de la partícula atravesando el detector.

Continuación Cuadro 7.

Variable	Definición	Naturaleza	Nivel de medición	Codificación
Bin de señal	<p>Intervalo entre dos pulsos sucesivos del reloj del sistema electrónico, equivalente a:</p> $1 \text{ bin} = \frac{1}{40 \text{ MHz}} = 25 \text{ ns}$ <p>Las señales digitalizadas son almacenadas en una memoria cíclica.</p>	Cuantitativa	De razón	Digitalización de 12 bins a 400ns en total, con un bin temporal de 25ns.
Pulso detectado por PMT	<p>Los fotones generados por la radiación Vavilov-Chererenkov son convertidos en una corriente, la cual pasa por un condensador y posteriormente para una resistencia en la que es medida la caída del potencial en los tiempos de carga y descarga de mismo. La corriente genera una lectura de potencial de la forma de pulsos con <i>rise-time</i> y <i>fall-time</i>.</p>	Cuantitativa	De razón	Dependerá de la partícula que se encuentre atravesando el medio de detección. Es expresada como Señal [ADC _p] vrs Tiempo [Bin x 25 ns]

5. Procedimiento

a. **Prueba de jarras.** Las tres cajas plásticas (**Figura 58**) fueron llenadas con agua municipal. La jarra 1 se definió como el control, las jarra 2 y jarra 3 fueron tratadas con dos agentes desinfectantes en las proporciones de ácido tricloroisocianúrico¹³ y peróxido de hidrógeno¹⁴ descritos en el **Cuadro 8. Definición de proporciones utilizadas en Prueba de jarras.** Las tres jarras fueron cubiertas con bolsas plásticas de polietileno negro, para mantenerlas aisladas de la radiación solar y simular la oscuridad en el tanque del detector. Se midió semanalmente la absorbancia y conductividad de cada una de ellas, utilizándose como control agua ultra pura para las mediciones. Las fechas de medición fueron: 02/09/2016 (Semana 1), 09/09/2016 (Semana 2), 19/09/2016 (Semana 3) y 23/09/2016 (Semana 4).

Cuadro 8. Definición de proporciones utilizadas en Prueba de jarras.

No. Jarra	Volumen de Agua municipal	Concentración de ácido tricloroisocianúrico ^a	Concentración de peróxido de hidrógeno ^b
1 (control)	28.94 ±0.12 L		
2	28.94 ±0.12 L	107.19 ±0.44ppm	
3	28.39 ±0.12 L		0.994.46*10 ⁻³ mL/L

a = la proporción fue definida en el rango establecido por Audelo *et al* (2013) y Núñez *et al* (2013)

b = La proporción de peróxido de hidrógeno fue definida con base en Quishpe *et al* (2015).

¹³ Agente común en esterilización de piscinas debido a su alto porcentaje de cloro

¹⁴ Baldry, M. (1983). *The bactericidal, fungicidal and sporicidal properties of hydrogen peroxide and peracetic acid.* Journal of Applied Bacteriology. 54: 417-423.

Figura 58. Cajas plásticas utilizadas para Prueba de jarras.



(Fuente propia)

1) Absorbancia. La absorbancia de cada una de las jarras fue medida con un espectrómetro (Figura 59), el cual fue conectado directamente a la computadora utilizándose el software “Pasco Spectrometer”. Para las mediciones se utilizaron cubetas plásticas. Estas fueron limpiadas con agua ultra-pura y con lavados del agua de las jarras respectivas, antes de utilizarlas. Las longitudes de onda de medición fueron de 379.940nm a 950.206nm. Se midió el rango espectral mencionado con una recurrencia entre 0.200 y 0.355 nm.

Figura 59. Medición de absorbancia de Prueba de jarras utilizando Spectrometer Pasco modelo PS-2600.



(Fuente propia)

2) **Conductividad.** El ensamble del PASPORT al SPARKlink y electrodo se encuentran en la Figura 42 (izquierda). El electrodo del sensor de conductividad fue sumergido en agua ultra-pura por un tiempo aproximado de 5 a 10 min antes de iniciar las mediciones. Las muestras fueron llevadas a estabilidad térmica a un rango de 23-24°C, manteniéndose en un baño de agua para mantener la recurrencia de la temperatura entre las muestras (Figura 60, Derecha). La frecuencia de toma de datos fue de 2 Hertz.

Figura 60. Izquierda) Multisensor PASCO con sus respectivas conexiones de análisis de temperatura y conductividad. Derecha) Medición de conductividad de Prueba de Jarras.



(Fuente Propia)

b. Reflectividad de Tyvek. Se siguió el procedimiento establecido por Filevich *et al* (1998) para la medición de reflectividad espectral del Tyvek inmerso en el agua. Toda la experimentación fue realizada en la oscuridad. En la (**Figura 61**) se puede ver el sistema ensamblado para las mediciones. El Rotary Motion Sensor se unió a la Ray Table para medir el ángulo de rotación de la misma, y en consecuencia tener un ángulo de rotación de la muestra. Este sensor de rotación fue conectado mediante Universal Interface 850 (**Figura 61, B**) y el sensor de luz fue conectado vía USB en la computadora, el cual fue configurado el rango de medición entre 0-270 Lux. El láser fue alineado al sensor de luz utilizando un espejo y prisma en la parte central de la Ray Table, se obtuvo que el ángulo de detección era equivalente a 0.69829 rad ($\sim 40^\circ$). En las mediciones se varió el ángulo de incidencia y se mantuvo fijo el ángulo de detección, la intensidad máxima fue correspondiente a la intensidad de reflexión del material y las demás intensidades corresponden a la luz dispersada por el material.

Mediciones:

1) Intensidad del haz de luz del láser sobre las muestras: se colocó un espejo en la parte central de la *Ray Table*, y al rotarla se tomaron mediciones a diferentes ángulos de incidencia, para encontrar el máximo de la intensidad reflejada.

2) Intensidad de luz dispersada y reflejada por la cubeta de medición: se colocó la cubeta con el vinilo de fibra de carbono (**Figura 62, Izquierda**) en la parte central de la *Ray Table*. Se fue girando a diferentes ángulos para encontrar el máximo de intensidad reflejada por el plástico.

3) Intensidad de luz dispensada y reflejada por Tyvek en aire: se colocó la cubeta con vinilo de fibra de carbono y Tyvek (**Figura 62, Derecha**) en la parte central de la *Ray Table*. Se fue girando para medir el ángulo de mayor intensidad de dispersión de la luz (ángulo de reflexión).

4) Intensidad de luz dispersada y reflejada por Tyvek en agua: la misma cubeta utilizada para las mediciones de reflectividad en aire (con vinilo de fibra de carbono y Tyvek) fue llenada con agua. En el caso de estas muestras por el índice de refracción del agua, el haz de luz incidente era dispersada hacia abajo. Razón por la cual, la altura de incidencia del láser definida por el prisma se varió hasta que se encontrara alineado con el sensor de luz. Consecuentemente, se fue girando para medir el ángulo de

mayor intensidad de dispersión de la luz (ángulo de reflexión). Los diferentes tipos de muestras utilizadas en estas mediciones fueron: agua de las tres jarras, agua ultra pura y agua del tanque del detector (tratada con Alumbre tipo B y peróxido de hidrógeno). Cada una de las veces en las que se cambió de muestra de agua, la cubeta era lavada con agua ultra-pura y enjuagada dos veces con la muestra de agua a utilizar.

Para mantener la recurrencia de la reflectividad de la parte frontal de la cubeta de muestreo, se utilizó la misma para todas las mediciones y se realizaron repeticiones sobre la misma muestra. Por el hecho que el láser fue constantemente encendido durante las corridas, para evitar el error de atenuación por sobrecalentamiento del mismo, se realizaron pausas de 30 min entre cada corrida. La intensidad luminosa y el ángulo de incidencia fueron ajustados a una curva similar a la planteada por Filevich *et al* (1998), en donde se asume una función cosenoidal (sugerida por la ley de Lambert) para ajustar la luz difusa y un término gaussiano para ajustar el pico.

Figura 61. Sistema utilizado para la medición de reflectividad de Tyvek. A) vista superior del sistema utilizado. B) Universal Interface 850 marca Pasco. C) vista superior de Basic Optics Diode Laser en Riel # 2. D) vista superior de Ray Table y Rotary Motion Sensor, encirculada en rojo se encuentra la cubeta, del espectrofotómetro, utilizada para las mediciones.

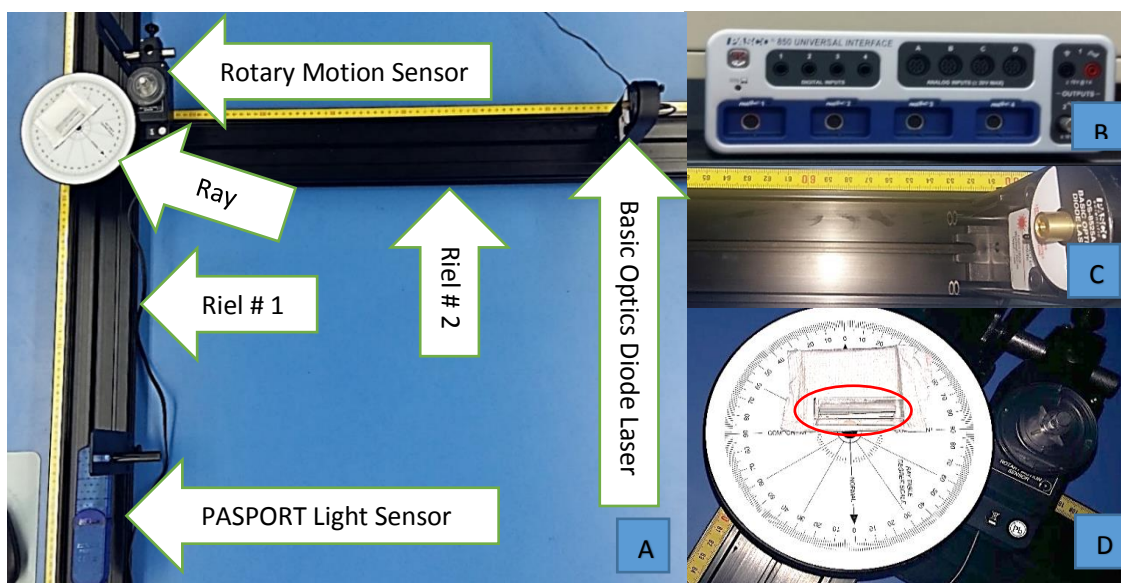
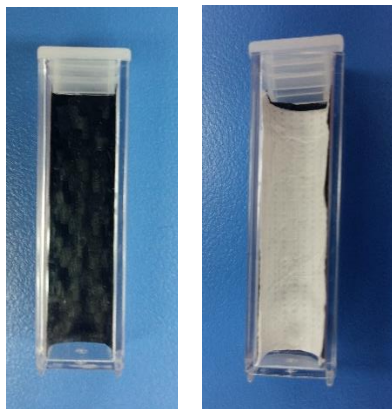


Figura 62. Cubeta de espectrofotómetro utilizada para las mediciones. Izquierda) Cubeta con vinilo de fibra de carbono DI-NOC marca 3M. Derecha) Cubeta con vinilo de fibra de carbono DI-NOC marca 3M y Tyvek marca Dupont ®.



(Fuente propia)

c. Determinación de índice de refracción. La medición del índice de refracción de diferentes muestras fue realizada utilizando un refractómetro de Abbe, de lámpara de D-Sodio (589.3nm). Las muestras medidas fueron: una solución de 100 ± 0.001 ppm Ácido tricloroisocianúrico, una solución 1 ± 0.05 mL/L H₂O₂, agua ultra pura, agua municipal y agua en el tanque de detección (tratada con Alumbre y H₂O₂).

d. Definición de proporciones de alumbre. Se recolectó una muestra de agua ingresada en el tanque (agua municipal), se le midió la turbidez y el pH. Con base en estos se definió la proporción de sulfato de aluminio tipo B (coagulante) a utilizar para el tratamiento del agua a ingresar en el tanque, según los parámetros establecidos por Núñez *et al* (2013). Se agregó el sulfato de aluminio (ver Procedimiento e. 2, p. 176) al tanque. Se recolectaron muestras de agua después de mantenerse en reposo por 24 horas, después decantar y al agregarse peróxido de hidrógeno como agente desinfectante. A todas las muestras recolectadas se les midió la absorbancia, conductividad, pH y turbidez.

1) Determinación de turbidez. Se utilizó un turbidímetro portátil. Se realizó una estandarización de dos puntos con soluciones de 0.01 NTU y 15NTU. Las muestras fueron medidas en la misma celda, para mantener la recurrencia de los datos. Antes de cada medición se realizaron enjuagues con agua ultra-pura en las celdas y

consecuentemente con las muestras a medir. Para las mediciones se pipetearon 10mL de muestras en las celdas.

2) **Determinación de absorbancia y conductividad.** Se realizó la misma metodología descrita en **Procedimiento a. 1) y 2)** (p. 169).

3) **Determinación de pH.** Se utilizaron Buffers de pH 4 y 7 para la calibración del potenciómetro Pasco (**Figura 63**, izquierda). Posterior a la calibración se realizaron las mediciones de pH a las diferentes muestras.

Figura 63. Izquierda) calibración de potenciómetro. Derecha) Medición de pH, conductividad y temperatura simultáneamente.



(Fuente propia)

e. Llenado de tanque de detección: K'inich Ahau. La primera vez que fue llenado el tanque, fue utilizando agua municipal sin tratar, y se realizaron mediciones utilizando este medio. La segunda vez, se instaló otro tanque en el segundo nivel del edificio C. Este fue llenado con agua municipal hasta alcanzar un volumen equivalente a la mitad del tanque (300L). El sulfato de aluminio (6.253 ± 0.1 g, equivalente a 10ppm) fue agregado con base en las proporciones establecida por Núñez *et al*, 2013, para valores de turbidez menores de 1 NTU. Se continuó llenando el tanque a durante media hora y fue dejada en reposo durante 20 horas. Posteriormente, el agua fue trasvasada al tanque en la parte posterior de C (Preparado en Procedimiento e. 1, p. 176), utilizándose uniones de mangueras. Con el agua trasvasada en el tanque, se procedió a agregar 600 ± 5 mL de agua oxigenada, para tener una proporción de 1mL/L (Quishque *et al*, 2015) de agente desinfectante.

f. Análisis de pulsos detectados. Se planteó un análisis comparativo similar al descrito Etchegoyen, *et al* (1996). La adquisición, de los pulsos detectados por el PMT, del sistema electrónico¹⁵ y computacional¹⁶ generó archivos que contenían los pulsos digitalizados en 12 bins a 400 ns, con un bin temporal de 25 ns, con una baseline fue de 50mV. Los datos obtenidos fueron los pulsos en Cuentas ADC de pico (ADCp) y bins de señal. Las corridas realizadas en el tanque del detector para el análisis comparativo fueron: PMT sumergido en agua municipal, PMT en el aire dentro del tanque y el PMT sumergido en el agua municipal tratada con sulfato de aluminio tipo B y peróxido de hidrógeno. Las fechas de las mediciones fueron 23/08/2016, 14/09/2016 y 07/10/2016, respectivamente. Los bins analizados fueron 12. Al tenerse una cantidad de datos mayor a 100,000 el tamaño muestral se calculó mediante:

$$N = \frac{(z_{\alpha/2})^2 p(1-p)}{E^2} = \frac{(1.96)^2 (0.5)(1-0.5)}{0.05^2} \approx 385 \text{ pulsos}$$

La ecuación anterior muestra el cálculo de tamaño muestral para una cantidad de datos mayor a 100,000. En donde $z_{\alpha/2}$ es la desviación del valor medio aceptado para alcanzar un nivel de confianza del 95% (valor de z que deja un área $\alpha/2$ en la cola

¹⁵ Descrita en módulo de este Megaproyecto presentado por Luis Pinillos y Pablo Duque.

¹⁶ Descrita en el módulo de este Megaproyecto presentado por Miguel Novella.

superior de la distribución normal estándar), p es la proporción poblacional esperada (50%), E es el margen de error máximo admitido (5%).

El margen de error asociado con la estimación por intervalo de proporción poblacional es $z_{\alpha/2}\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/N}$, el cual se basa en el valor de $z_{\alpha/2}$, en la proporción muestra \bar{p} y el tamaño de la muestra N . Al despejarse para N se obtiene la ecuación. Como la proporción muestral \bar{p} se conoce hasta analizar la muestra, se planteó un valor p que permitió analizar una proporcionalidad de efecto del 50% ($p=0.50$) en los datos, maximizando por lo tanto la cantidad muestral. Además, para mantener un margen de error mínimo sobre la muestra se trabajó con un 5%.

6. Plan de análisis de los datos y presentación de resultado.

- El índice de refracción fue utilizado mediante una simulación en Geant4 en el módulo de este Megaproyecto de *Caracterización de señales de eventos* por Daniel Eduardo Conde Villatoro.
- Reflectividad del Tyvek: La intensidad luminosa (lx) detectada por el sensor a diferentes ángulos fue ajustada a la Ecuación utilizada por Filevich (1998). Se utilizó el ajuste de curvas brindado por PASCO Capstone Software. El máximo brindado por la función de ajuste fue utilizado como el máximo de intensidad dispersada, equivalente al ángulo e intensidad de reflexión del material.
- Para evaluar el efecto individual y en conjunto, de las semanas de medición y las jarras con diferentes tratamientos sobre la conductividad, se utilizó un modelo “ANOVA de dos vías” (Semana, Jarra, conductividad). Este modelo fue analizado con la “Prueba de efectos inter-sujetos”, “Medias marginales estimadas” para los datos de conductividad de cada una de las jarras por semanas de medición. Para las absorbancias se realizó un análisis similar, pero con el modelo de “ANOVA de dos vías” se realizaron separación de las diferentes relaciones de los cuatro bloques (Semana, Jarras, longitud de onda, absorbancia). El análisis estadístico fue realizado en SPSS statistics.

- Para realizar un análisis comparativo de los pulsos detectados por el PMT para las tres diferentes corridas se realizó un análisis de “ANOVA de vías” (corrida, bin, señal). Este modelo fue analizado con la “Prueba de efectos inter-sujetos”, “Medias marginales estimadas”. El análisis estadístico fue realizado en SPSS statistics.

B. Resultados y discusión

La polarización de las partículas y la propagación de la radiación electromagnética generada en el paso de partículas relativistas (radiación Vavilov-Cherenkov) son influenciadas por las características del medio en el que se distribuyen (Cherenkov, 1958); que en el caso de los WCD es el agua en el detector. Además, por la dependencia de ciertos parámetros de información cuantitativa, de las cascadas de área extensa, a la intensidad de radiación detectada por el PMT (Asorey, 2012), es importante conocer las características del medio en el que se distribuyen, la reflectividad del material interno en el tanque (difusor interno), la señal producida por la ventana de entrada del PMT y conocer ciertas características que permitan analizar las variaciones en el tiempo del agua en el detector. Razón por la cual, en el presente documento se realizó el estudio del agua en términos de índice de refracción, absorbancia, conductividad, reflectividad de Tyvek y señal de partículas secundarias (detectada por fotomultiplicador), para la caracterización del medio en el que se trabajó el Detector de Radiación Vavilov-Cherenkov de agua.

1. Prueba de jarras

a. **Conductividad.** Según Hao-Oi *et al* (2009) uno de los parámetros de calidad de agua en los WCD es la resistividad (el recíproco de la conductividad) del agua, ya que su disminución es el resultado de la contaminación del material mediante el contacto con el medio. Uno de estos contactos con el ambiente es cuando se absorbe el dióxido de carbono del aire; formando ácido carbónico y reduciendo su resistividad (Cárdenas y Galvis, 2011). Estas mediante interacciones intermoleculares puedan generar distorsión en la polarización de las moléculas del agua para la formación de la radiación Vavilov-Cherenkov; por lo que se podría utilizar como un parámetro de degradación de calidad de agua en los WCD. Además, por la dependencia de la propagación de las ondas electromagnéticas a la conductividad del medio en el que se distribuyen (Griffiths, 1999) es un parámetro importante para el análisis de la distribución de la radiación en el medio y la calidad del agua.

El estudio realizado de la existencia de la variabilidad respecto al tiempo de la conductividad de emisión de radiación Vavilov-Cherenkov para agua municipal, agua municipal con ácido tricloroisocianúrico (107.19 ± 0.44 ppm) y agua municipal con peróxido de hidrógeno ($0.99 \pm 4.46 \cdot 10^{-3}$ mL/L); fue llevado a cabo en cuatro semanas. Los reactivos utilizados fueron elegidos como agentes desinfectantes, debido al posible desarrollo de microorganismos. Estos agentes fueron analizados aisladamente de otros factores, para comprender el efecto real de estos agentes sobre el agua potable obtenida de la universidad. Los promedios y desviación estándar de los valores de conductividad y temperatura de las cuatro semanas se encuentran presentes en el **Cuadro 9**. Las temperaturas de las corridas fueron mantenidas entre $22.83 - 24.4^{\circ}\text{C}$. Por dependencia de la conductividad de la temperatura (Lenntech, 2015) y al tenerse una diferencia máxima de 1.57°C , se puede inferir que la distribución de la corriente eléctrica, brindada por el puente de conductividad, fue recurrente durante las mediciones y por lo tanto se consideraron confiables los datos obtenidos.

Cuadro 9. Análisis de valores de conductividad asignada a cada semana de medición de las tres diferentes jarras.

Semana	Jarra	Variable	Promedio ^a	Desviación ^a	Min. ^a	Max. ^a
1	1	Temperatura ± 0.01 °C	23.69	0.01	23.68	23.7
	1	Conductividad (10X Probe) ± 1 $\mu\text{S/cm}$	220.64	6.48	204	243
	2	Temperatura ± 0.01 °C	23.84	0.00	23.83	23.84
	2	Conductividad (10X Probe) ± 1 $\mu\text{S/cm}$	231.27	8.02	211	245
	3	Temperatura ± 0.01 °C	23.86	0.01	23.83	23.87
	3	Conductividad (10X Probe) ± 1 $\mu\text{S/cm}$	218.91	7.56	199	233
2	1	Temperatura ± 0.01 °C	24.24	0.03	24.23	24.34
	1	Conductividad (10X Probe) ± 1 $\mu\text{S/cm}$	189.65	0.48	189	190
	2	Temperatura ± 0.01 °C	24.17	0.02	24.12	24.2

Continuación Cuadro 9.

Semana	Jarra	Variable	Promedio ^a	Desviación ^a	Min. ^a	Max. ^a
	2	Conductividad (10X Probe) ± 1 $\mu\text{S/cm}$	202.29	0.46	202	203
	3	Temperatura	24.38	0.02	24.34	24.4
	3	Conductividad (10X Probe) ± 1 $\mu\text{S/cm}$	190.69	0.46	190	191
3	1	Temperatura ± 0.01 °C	22.85	0.01	22.83	22.87
	1	Conductividad (10X Probe) ± 1 $\mu\text{S/cm}$	122.23	3.38	117	125
	2	Temperatura ± 0.01 °C	23.04	0.08	22.92	23.25
	2	Conductividad (10X Probe) ± 1 $\mu\text{S/cm}$	152.87	5.45	137	156
	3	Temperatura ± 0.01 °C	23.01	0.02	22.98	23.05
	3	Conductividad (10X Probe) ± 1 $\mu\text{S/cm}$	150.67	0.47	150	151
4	1	Temperatura ± 0.01 °C	23.62	0.01	23.6	23.62
	1	Conductividad (10X Probe) ± 1 $\mu\text{S/cm}$	188.40	0.64	187	190
	2	Temperatura ± 0.01 °C	23.21	0.00	23.21	23.22
	2	Conductividad (10X Probe) ± 1 $\mu\text{S/cm}$	237.03	0.61	236	238
	3	Temperatura ± 0.01 °C	23.15	0.01	23.14	23.16
	3	Conductividad (10X Probe) ± 1 $\mu\text{S/cm}$	197.64	0.54	196	199

a = El tamaño de las muestras analizadas fue de N= 74.

En el análisis ANOVA de dos vías realizado sobre los datos completos del Cuadro 12, se obtuvo la prueba intersujetos que se presenta en el **Cuadro 10** y, el análisis Post-Hoc en los **Cuadro 11** y

Cuadro 12. La prueba de intersujetos demuestra que por el valor de sig. de $3.961 * 10^{-295}$ al ser mucho menor al valor-F de 550.423, para el efecto de las jarras-semanas, existe una varianza significativa de la dispersión de los datos respecto a las medias estimadas. Por lo que se rechaza la hipótesis nula planteada para el modelo (X. ANÁLISIS DE RESULTADOS), y por lo tanto se considera que hay una interacción significativa sobre las medias estimadas. En el caso de la prueba intersujetos sobre el efecto de las jarras y el efecto de semanas sobre la conductividad, expuso que los valores de sig. 0.000 al ser menores a los valores-F de 2937.512 y 16376.257, respectivamente, existe una varianza significativa de la dispersión de las medias de conductividad respecto a ambas variables. Por lo que, se rechazan las hipótesis nulas del modelo (X. ANÁLISIS DE RESULTADOS); y se considera que hay diferencia estadísticamente significativamente en las medias de interés de la conductividad a las jarras y semanas aisladamente. En la **Figura 64** se puede ver que las medias marginales estimadas para las mediciones semanales presentan cambios con el tiempo, con cierta relación con el tratamiento aplicado a cada una de las mediciones. Esto permite inferir que el efecto del tiempo de medición, el efecto del tratamiento realizado a cada jarra y la interacción entre ambas variables causan una diferencia significativa en la conductividad.

Cuadro 10. Prueba de efectos inter-sujetos para evaluar el efecto de toma de datos de conductividad asignada a una semana, jarra o la interacción del efecto de las semanas y jarras.

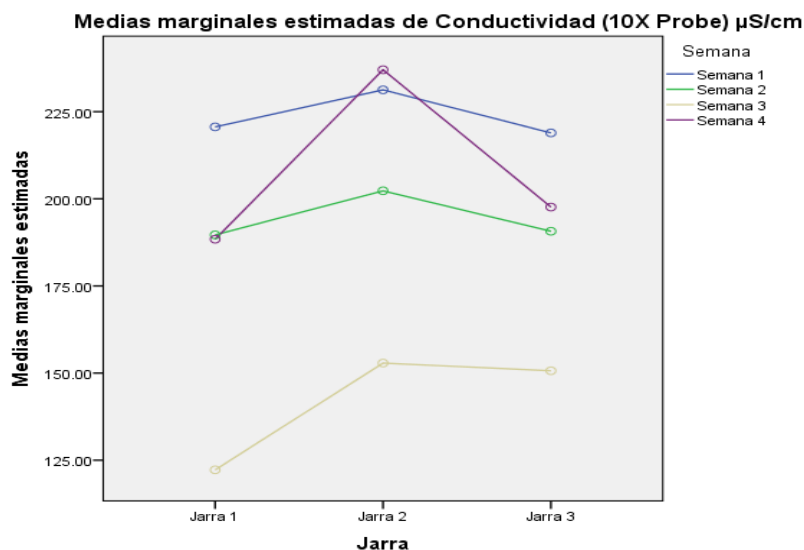
Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Conductividad (10X Probe) $\mu\text{S/cm}$

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	1003452.030 ^a	11	91222.912	5300.576	.000
Interceptación	33128082.490	1	33128082.490	1924932.161	.000
Jarra	101109.147	2	50554.573	2937.512	.000
Semana	845506.172	3	281835.391	16376.257	.000
Jarra * Semana	56836.711	6	9472.785	550.423	3.961E-295
Error	15282.480	888	17.210		
Total	34146817.000	900			
Total corregido	1018734.510	899			

a. R al cuadrado = .985 (R al cuadrado ajustada = .985)

Figura 64. Medias marginales estimadas de conductividad para las tres jarras y las mediciones realizadas semanalmente.



El análisis Post-Hoc realizado sobre las mediciones de conductividad asignadas a las jarras (Cuadro 14), genero tres subconjuntos homogéneos, de las tres jarras respectivas, que causaban un efecto significativo sobre la conductividad. La jarra 2, con ácido

tricloroisocianúrico (107.19 ± 0.44 ppm) en agua municipal, causó la mayor diferenciación de la conductividad en comparación de las otras dos jarras. Con una diferencia de la jarra 1 (control) de aproximadamente de $25 \mu\text{S}/\text{cm}$. En cambio, la jarra 2, con peróxido de hidrógeno ($0.99 \pm 4.46 \cdot 10^{-3} \text{ mL}/\text{L}$) en agua municipal, causó el menor efecto sobre la conductividad; con una diferencia de la media estimada respecto a la jarra 1 (control) de aproximadamente de $9 \mu\text{S}/\text{cm}$. La diferencia significativa de la jarra 2, respecto a las demás jarras, puede ser explicada por la reacción del ácido tricloroisocianuro con el agua. Esta genera un medio acuoso que da como productos el ácido cianúrico y ácido hipocloroso (Pinto y Rohrig, 2003). Por lo que se infiere que al difundirse en el agua genera una red de los iones hipoclorito y produce una corriente eléctrica en el agua. Además, por la estructura atómica del ácido cianúrico se puede inferir que la densidad electrónica es distribuida sobre todos los átomos, generando una nube de electrones por la resonancia en el sistema. Por lo que se infiere que la resonancia del ácido contribuye en el aumento de la conductividad del agua. En el caso de la jarra 3, es considerable un aumento en la conductividad por parte del peróxido de hidrógeno agregando, ya que al ser disuelto en el agua puede que las interacciones intermoleculares con las moléculas de peróxido hayan causado una variación en la distribución eléctrica de agua.

Cuando el medio es dieléctrico o con una conductividad que tiende a cero las ondas electromagnéticas lo penetran de forma casi indefinida (Muñoz y *et al*, 2012). Este hecho, permite considerar que el peróxido de hidrógeno al causar un menor efecto sobre la conductividad, en comparación con el ácido tricloroisocianuro, no llegue a atenuar tan significativamente la distribución de las ondas electromagnéticas generadas por la radiación Vavilov-Cherenkov. Además, por los valores de las medias estimadas para el efecto de las jarras se puede inferir que la acción oxidante del peróxido de hidrógeno no genere una cantidad demostrativa de iones, en comparación del ácido tricloroisocianuro. Por lo que se puede inferir que los iones a pesar de generan una polarización iónica, para la presencia de peróxido de hidrógeno, no afecten significativamente la polarización electrónica causada por el paso de la partícula relativista que genera la Radiación Vavilov-Cherenkov (Chrenkov, 1958).

Cuadro 11. Prueba de Post-Hoc para evaluar el efecto de toma de datos de conductividad asignada a una jarra.

Conductividad (10X Probe) $\mu\text{S/cm}$

HSD Tukey^{a,b}

Jarra	N	Subconjunto		
		1	2	3
Jarra 1	-	180.2300		
Jarra 3	300		189.4767	
Jarra 2	300			205.8633
Sig.		1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 17.210.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 300.000.

b. Alfa = .05.

En la prueba Post-Hoc con base en las semanas de medición, de forma análoga al efecto de las jarras sobre la conductividad, se obtuvo que cada semana generó diferentes subconjuntos homogéneos (

Cuadro 12). La primera semana de medición causó el mayor efecto sobre la conductividad en las Jarras. El efecto de la segunda semana fue aproximadamente 29 unidades menor que la primera, la tercera de 82 unidades menor y la cuarta 16 (respecto a la primera semana). Una posible inferencia sobre la alta conductividad en la primera semana, puede ser explicada por el estado inicial de la formación de los iones por parte de ácido tricloroisocianurico y el efecto de interacciones intermoleculares (como la formación de puentes de hidrógeno) y la actividad oxidante del peróxido de hidrógeno con el agua (Cotton, 1972). Mientras que la disminución de la conductividad en las dos semanas siguientes (2 y 3), permite inferir el efecto de diferentes factores en las jarras. En el caso de la jarra 2, es considerable que los iones formados por la disolución del ácido tricloroisocianuro en el agua, hayan comenzado a reaccionar con los diferentes electrolitos disueltos en ella, disminuyendo los iones disponibles, y por lo tanto

reduciendo la conductividad. El decrecimiento de la conductividad de la jarra 3, con peróxido de hidrógeno, en las semanas 2 y 3 puede ser explicada por su baja estabilidad termodinámica ($\Delta H = -99$ kJ/mol) descomponiéndose mediante la reacción $2 \text{H}_2\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{O}_2$, (Cotton y Wilkinson, 1972). Esta descomposición es catalizada por la presencia de trazas de metales pesados (Cotton y Wilkinson, 1972), los cuales se pueden encontrar presentes en aguas municipales bajo límites permisibles (EPA, 2016).

En el caso de la última semana de medición, la conductividad aumento significativamente para todas las jarras en comparación a la segunda y la tercera semana. Con base en esto, es considerable que la conductividad no solo sea afectada por el estado de la reacción. Se puede asumir que al dejar depositada el agua en las jarras, esta pudo absorber el dióxido de carbono del aire, formando ácido carboxílico y aumentando la conductividad del agua (Cárdenas y Galvis, 2011). El ingreso de esta especie en el agua de las jarras, a pesar de mantenerse cerradas, es considerable ya que no eran herméticas; por lo que no aislaban el agua de la entrada del aire.

Cuadro 12. Prueba de Post-Hoc para evaluar el efecto de toma de datos de conductividad asignada a una jarra.

Conductividad (10X Probe) $\mu\text{S}/\text{cm}$

HSD Tukey^{a,b}

Semana	N	Subconjunto			
		1	2	3	4
Semana 3	225	141.9200			
Semana 2	225		194.2133		
Semana 4	225			207.6889	
Semana 1	225				223.6044
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 17.210.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 225.000.

b. Alfa = .05.

b. Absorbancia. Por la dependencia de la intensidad de la señal a detectar por el PMT y la absorbancia de la radiación del medio, dependiendo de la longitud de onda de la misma se realizó un análisis sobre el tema. Se estudió la existencia de variabilidad respecto del tiempo de la absorbancia a longitudes de onda de emisión de radiación Vavilov-Cherenkov para agua municipal, agua municipal con ácido tricloroisocianúrico ($107.19 \pm 0.44\text{ppm}$) y agua municipal con peróxido de hidrógeno ($0.99 \pm 4.46 \cdot 10^{-3} \text{ mL/L}$); durante cuatro semanas. En las **Figura 65, Figura 66, Figura 67** se puede observar la variación de la absorbancia durante las cuatro semanas de medición. En las que la semana cuatro mostró un cambio abrupto sobre la absorbancia en el límite de la región visible y la región infrarroja. Para analizar los efectos sobre la absorbancia (variable dependiente) por parte de la semana de medición, las jarras y la longitud de onda (variables independientes) se realizó un análisis ANOVA de dos vías, para cada par de variables independientes. Los resultados de las pruebas ANOVA se encuentran presentes en los cuadros **Cuadro 13, Cuadro 14, Cuadro 15**.

Figura 65. Absorbancia de las cuatro semanas de medición de la Jarra 1 (control), en un rango espectral de $379.94 - 950.206 \pm 0.001\text{nm}$.

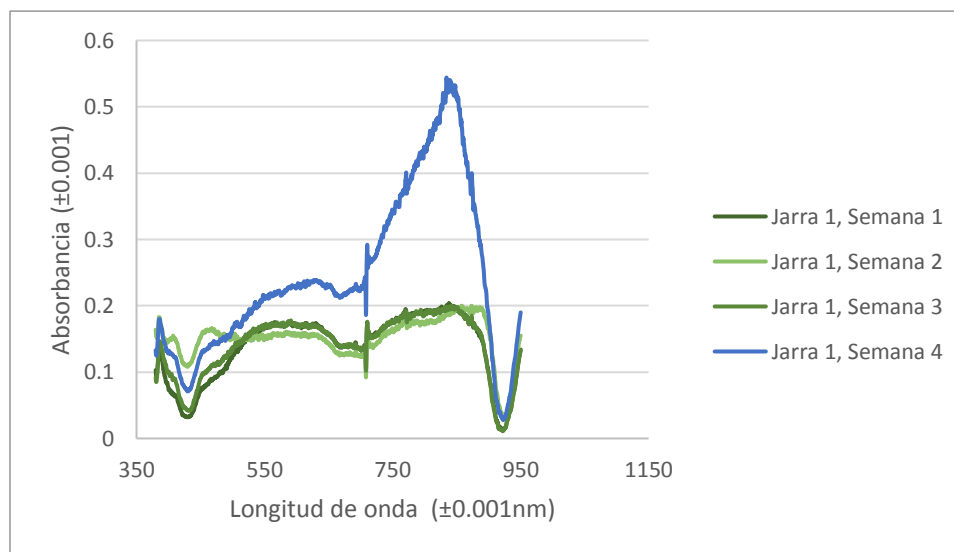


Figura 66. Absorbancia de las cuatro semanas de medición de la Jarra 2 (107.19 ± 0.44 ppm de ácido tricloroisocianúrico) en un rango espectral de $379.94 - 950.206 \pm 0.001$ nm.

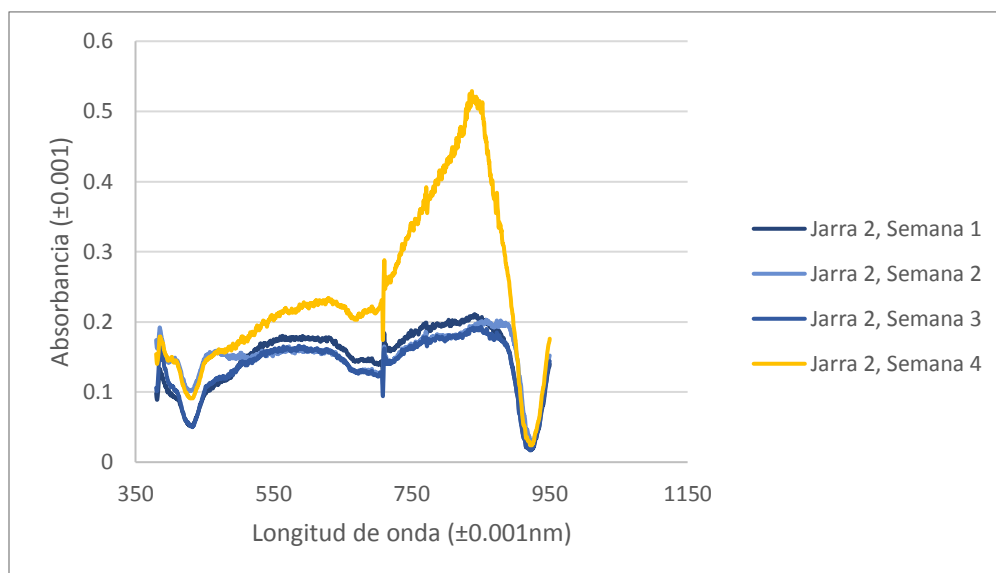
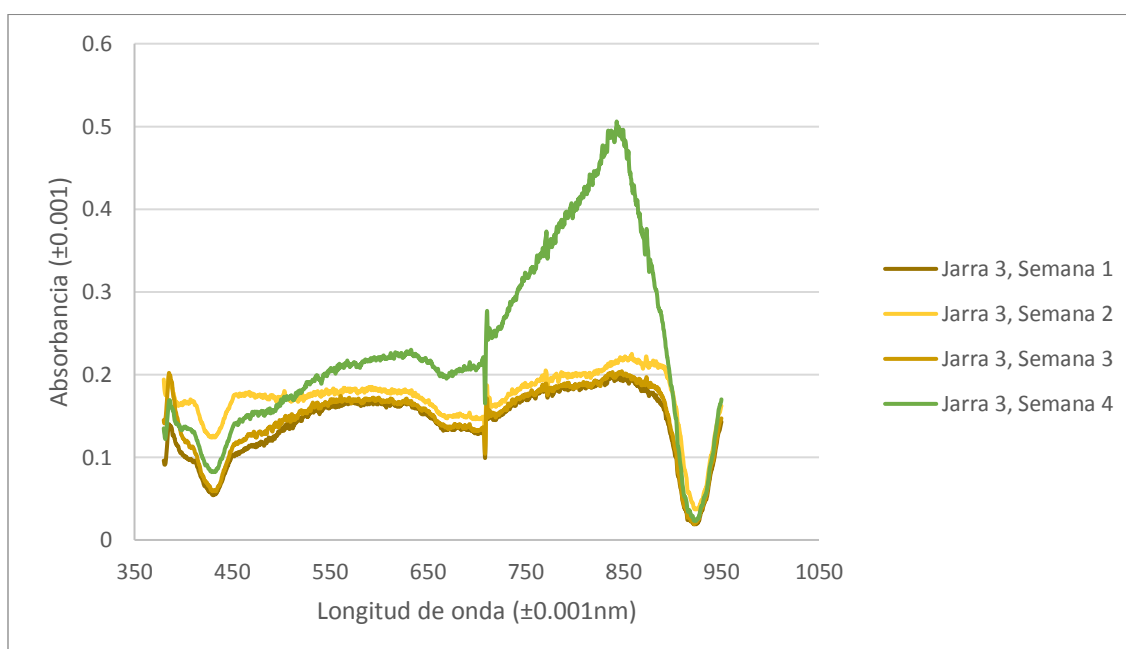
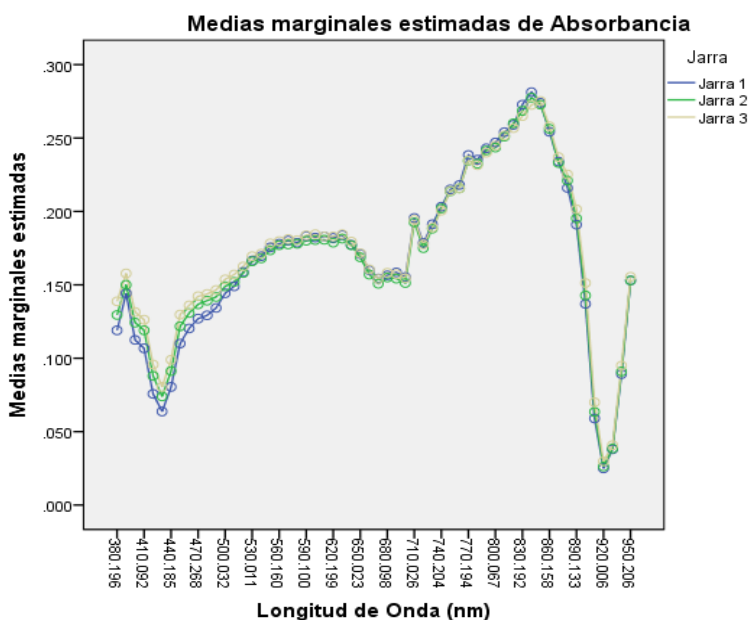


Figura 67. Absorbancia de las cuatro semanas de medición de la Jarra 3 ($0.99 \pm 4.46 \cdot 10^{-3}$ mL/L de peróxido de hidrógeno) en un rango espectral de $379.94 - 950.206 \pm 0.001$ nm.



En la **Figura 68** se puede ver que las tres jarras generan medias marginales estimadas visualmente similares, mientras que las longitudes de onda de absorción (entre 390.195 y 950.206 nm) generan variaciones marcadas en las absorbancias. La prueba intersujetos (**Cuadro 13**) indica la similitud de las absorbancias, para el efecto de las jarras-longitud de onda, a un nivel sig. 1.00. Conjuntamente, al ser el valor F menor que la sig. las medias estimadas con base en la interacción de las variables no causa una varianza significativa; con una mínima dispersión de las medias a un nivel de 0.015. Se rechaza la hipótesis nula del modelo (X. Análisis de resultados), y por lo tanto no existe una interacción estadísticamente significativamente de las variables sobre las absorbancias.

Figura 68. Medias marginales estimadas de absorbancias para las tres jarras y las longitudes de onda.



En la prueba de efectos intersujetos para la dependencia la absorbancia a la longitud de onda de medición se obtuvo una sig. $3.387 \cdot 10^{-49}$, al ser mucho menor al valor-F 9.158 se considera una varianza significativa en la dispersión de las medias de las absorbancias respecto a la longitud de onda. Con base en lo anterior, se rechaza la hipótesis nula para el modelo (X. Análisis de resultados) y por lo tanto existe diferencia estadísticamente significativa en las medias de absorbancia respecto a las diferentes longitudes de onda de medición. En el caso del efecto de las diferentes jarras sobre la absorbancia, se obtuvo una similitud entre las medias estimadas a un nivel de sig. 0.729. Además, las medias de

las absorbancias respecto a las jarras son dispersada a un nivel 0.316 (Valor-F). Con base en lo mencionado no se rechaza la hipótesis nula planteada (X. Análisis de resultados), por lo tanto, no existe una diferencia estadísticamente significativa de las absorbancias respecto a la presencia de peróxido de hidrógeno, ácido tricloroisocianuro y la ausencia de ellos.

Cuadro 13. Prueba de efectos inter-sujetos para evaluar el efecto de toma de datos de absorbancias asignada a cada Jarra, longitud de onda (LonO) o la interacción entre ambas.

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Absorbancia

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	2.202 ^a	173	.013	3.031	2.931E-22
Interceptación	20.233	1	20.233	4818.665	9.436E-266
LongO	2.192	57	.038	9.158	3.387E-49
Jarra	.003	2	.001	.316	.729
LongO * Jarra	.007	114	6.358E-5	.015	1.000
Error	2.192	522	.004		
Total	24.626	696			
Total corregido	4.394	695			

a. R al cuadrado = .501 (R al cuadrado ajustada = .336)

En la prueba intersujetos en el **Cuadro 14**, el efecto de las semanas-longitud de onda indicó una similitud de las medias estimadas a un nivel de 8.58010^{-248} . El valor-F brindó dispersión a un nivel de 64.927, por la interacción de las variables. Al ser la sig. mucho menor que el valor-F, se rechaza la hipótesis nula para el modelo (X. Análisis de resultados), y por lo tanto existe una diferencia estadísticamente significativa en las absorbancias por la interacción del efecto de las semanas y longitudes de onda de medición. Las absorbancias asignadas aisladamente a las semanas de medición, en la prueba intersujetos, brindo una similitud entre las medias estimadas a un nivel de sig. 0.000. Además, indica una dispersión de las medias a un nivel de 3808.933 (Valor-F). Al ser la significancia mucho menor que el valor-F, se rechaza la hipótesis nula del modelo (X. Análisis de resultados), por lo que existe diferencia estadísticamente significativa

entre las medias de las absorbancias asignadas a las semanas de medición. Además, al igual que en el modelo anterior en el **Cuadro 13**, la sig (0.000, **Cuadro 14**) es mucho menor que el valor-F (401.576, **Cuadro 14**), por lo que confirmar el efecto de la longitud de onda de medición respecto a las absorbancias obtenidas.

Cuadro 14. Prueba de efectos inter-sujetos para evaluar el efecto de toma de datos de absorbancias asignada a cada semana, longitud de onda (LonO) o la interacción entre ambas.

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Absorbancia

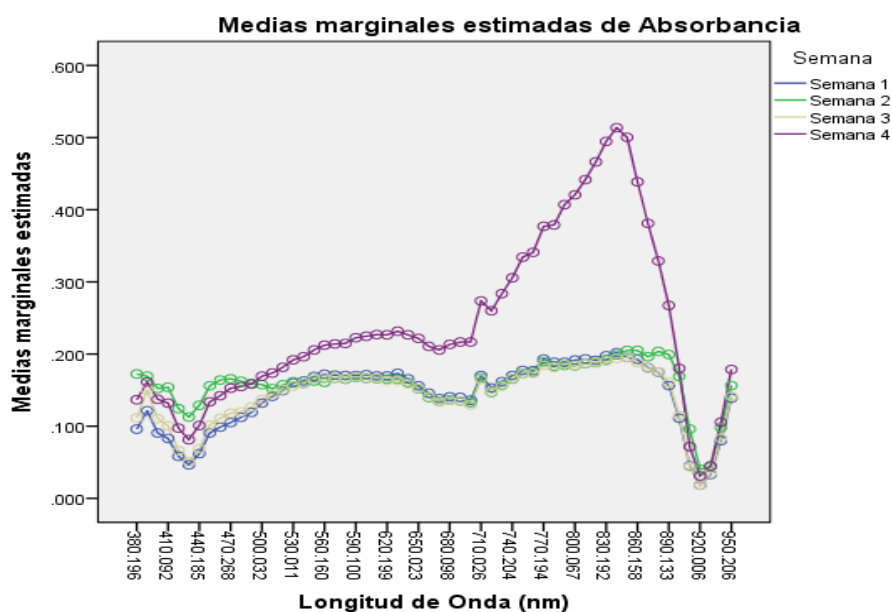
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	4.349 ^a	231	.019	196.620	.000
Interceptación	20.233	1	20.233	211300.086	.000
LongO	2.192	57	.038	401.576	.000
Semana	1.094	3	.365	3808.933	.000
LongO * Semana	1.063	171	.006	64.927	8.580E-248
Error	.044	464	9.575E-5		
Total	24.626	696			
Total corregido	4.394	695			

a. R al cuadrado = .990 (R al cuadrado ajustada = .985)

En la **Figura 69** se puede observar la diferencia en las medias marginales estimadas para las absorbancias asignadas a las diferentes longitudes de onda (de 390.195 a 950.206nm, como en la **Figura 68**) y a las cuatro semanas de medición. En las mediciones realizadas en la primera, segunda y tercera semana las absorbancias, establecidas entre 530.011 y 890.133 nm (región verde del espectro visible hasta el límite VIS-IR), muestran similitud visible entre las medias estimadas. Para las regiones de 530.011nm a 710.026nm (región verde del espectro visible hasta el límite VIS-IR) es observable un aumento ligero en las absorbancias asignadas a la cuarta semana. Las longitudes de onda entre 890.133 y 950.20 nm (región infrarroja), las cuatro semanas de medición exponen visualmente que no es considerable una varianza entre ellas.

Gráficamente, en la **Figura 69**, se muestra el aumento abrupto de la cuarta semana en la región del límite del espectro visible y la región infrarroja (710.026 a 890.133 nm). Esta región presento una máxima absorción, del haz de luz incidente, de aproximadamente 0.5, lo cual representa que el agua de las jarras no transmitió más que el 31.62% ($T = 10^{-0.5}$)¹⁷ de la luz emitida para la región del límite del espectro VIS-IR. El aumento puede ser explicado por la misma razón inferida en la sección anterior (A. prueba de Jarras/ a. Conductividad) para la cuarta semana. En la que se consideró que, al dejar las jarras almacenadas durante cuatro semanas, la absorción del dióxido de carbono del aire y su posterior hidratación (para formar ácido carboxílico) haya sido significativa para causar un aumento en esta variable. Esta suposición es considerable para esta región, ya que el ácido carboxílico absorbe en la región infrarroja para realizar transiciones en sus estados energéticos vibracionales (Wade, 2011).

Figura 69. Medias marginales estimadas de absorbancias para las cuatro semanas de medición y las longitudes de onda.



¹⁷ La transmitancia fue calculada en base la ecuación 9 en IV. MARCO CONCEPTUA/ F. CALIDAD DE AGUA/ d. Absorbancia.

En la región azul del espectro visible y la región UV (380.196 a 530.011nm) es observable una mayor absorbancia para la segunda semana, seguida por la cuarta y una semejanza entre la primera y tercera semana (**Figura 69**). Al no ser un cambio fuerte hace considerables que, en las cuatro semanas, el efecto del tiempo sobre las absorbancias, en esta región, sea despreciable. Además, por presentar absorbancias menores a 0.2 para todas las semanas, la radiación electromagnética en la región azul del espectro visible y la UV es transmitida más del 63.09% ($T = 10^{-0.2}$) en el agua de las jarras.

La prueba de efectos intersujetos realizada sobre el efecto de las jarras, semanas y la interacción entre ellas se encuentra presente en el **Cuadro 15**. En él es observable que el efecto de la interacción de las jarras-semanas sobre las absorbancias generan una similitud entre las medias a un nivel sig. 0.574. Además, la dispersión de las medias de las absorbancias presenta una varianza de 0.795 (valor-F). La significancia al ser bastante similar al valor-F, permite no rechazar la hipótesis nula planteada para el modelo (X. Análisis de resultados), por lo que existe similitud estadísticamente significativa entre las medias de las absorbancias asignadas al efecto de la interacción entre las jarras y las semanas de medición. En el caso del efecto de las jarras sobre las absorbancias, se obtuvo una similitud entre las medias un nivel sig. 0.758 y una dispersión de las medias con una varianza de 0.277; reconfirmando que el efecto de las jarras no causa un efecto significativo en las absorbancias, como lo obtenido en el **Cuadro 13**. Para el efecto de las semanas, se obtiene el mismo patrón que en el **Cuadro 14**, con una significancia ($563 \cdot 10^{-42}$) mucho menor que el valor-F (76.201). Por lo que se reconfirma la desigualdad de las medias causadas por el efecto de la semana de medición sobre las absorbancias.

El análisis Post-Hoc realizado sobre los datos y el efecto de las semanas en la variación de las absorbancias se encuentra presente en el **Cuadro 16**. Esta prueba da la formación de dos subconjuntos homogéneos, en los que la cuarta semana es significativamente diferente a las otras tres semanas de medición. Además, brinda una similitud entre las medias estimadas de las absorbancias para las primeras tres semanas a un nivel sig. 0.143. En la **Figura 70** es observable el cambio drástico de la cuarta semana

y la tendencia a una fuerte similitud entre las primeras tres semanas de medición. Razón por la cual, se reconfirma la tendencia analizada sobre la **Figura 69**.

Cuadro 15. Prueba de efectos inter-sujetos para evaluar el efecto de toma de datos de absorbancias asignada a cada semana, jarra o la interacción entre ambas.

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Absorbancia

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	1.120 ^a	11	.102	21.266	2.256E-37
Interceptación	20.233	1	20.233	4227.235	5.232E-295
Semana	1.094	3	.365	76.201	1.563E-42
Jarra	.003	2	.001	.277	.758
Semana * Jarra	.023	6	.004	.795	.574
Error	3.274	684	.005		
Total	24.626	696			
Total corregido	4.394	695			

a. R al cuadrado = .255 (R al cuadrado ajustada = .243)

Cuadro 16. Prueba de Post-Hoc para evaluar el efecto de toma de datos de absorbancias asignadas a cada una de las semanas de medición.

Absorbancia

HSD Tukey^{a,b}

Semana	N	Subconjunto	
		1	2
Semana 1	174	.14259	
Semana 3	174	.14273	
Semana 2	174	.15842	
Semana 4	174		.23826
Sig.		.143	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

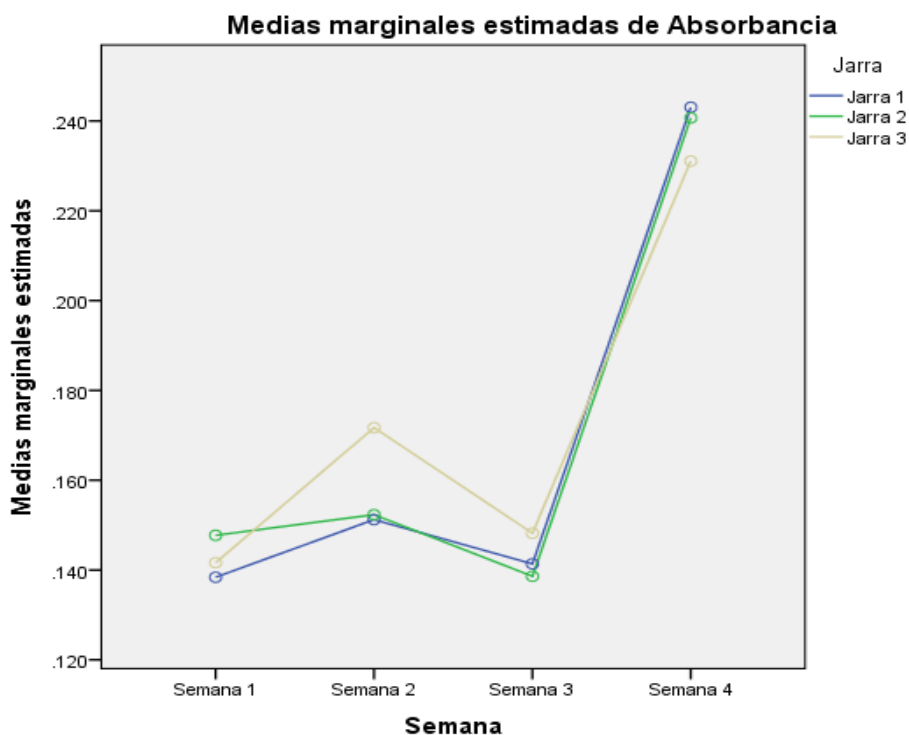
Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = .005.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 174.000.

b. Alfa = .05.

Figura 70. Medias marginales estimadas de absorbancias para las cuatro semanas de medición y las tres jarras.



Las variaciones mencionadas en la región infrarroja para la cuarta semana (**Cuadro 14, Cuadro 15, Figura 69, Figura 70**) permiten especular que, al ser propias de la emisión de la parte interna del cono de radiación Vavilov-Cherenkov (Cherenkov, 1958), el aumento de la absorción en esta región no cause un efecto significativo sobre la detección de la emisión de la radiación Vavilov-Cherenkov por el PMT, generada al paso de partículas relativistas en el tanque del detector. En el caso de la región azul del espectro visible y ultravioleta, durante las cuatro semanas de medición, el mínimo de absorbancia se encuentra entre 410.092 y 470.268nm (**Figura 69**), el cual coincide con la longitud de onda de máxima respuesta del PMT, 420 nm (Hamamatsu Photonics, 2013). Además, el cono exterior de la radiación electromagnética, generado por la emisión de la radiación Vavilov-Cherenkov, es mayoritariamente en la región azul del espectro visible y en la región UV (Cherenkov, 1958). Razón por la cual, es considerable que, al mantener el agua estancada por un mes, el efecto del ambiente no genere un cambio significativo en la absorbancia del agua, en el área de interés de detección de la radiación

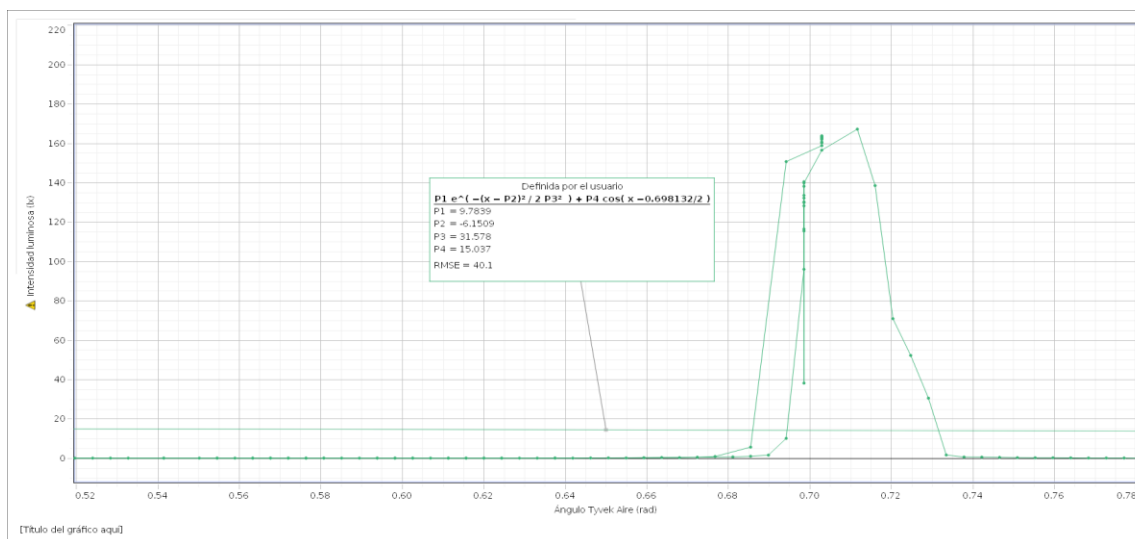
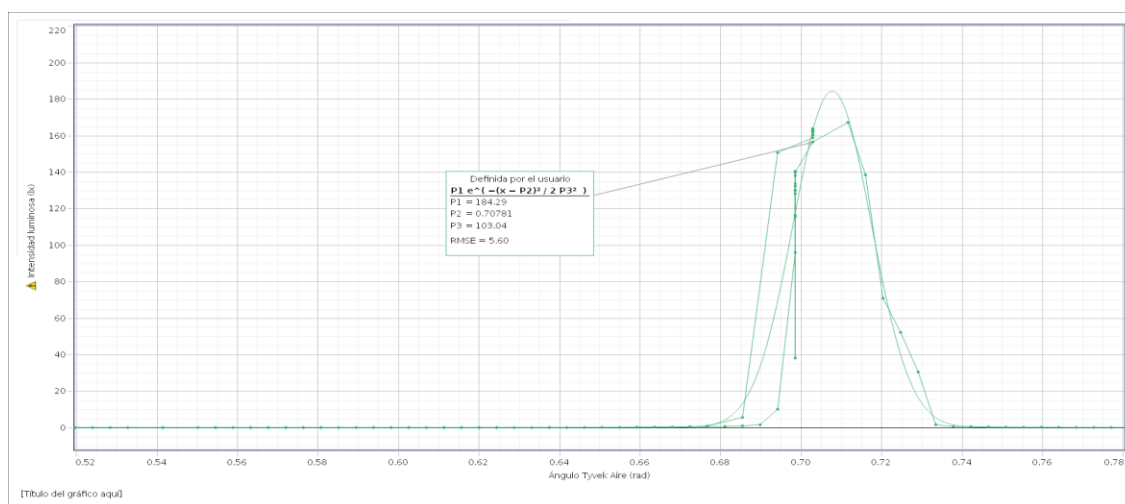
Vavilov-Cherenkov por el PMT. Se recomienda realizar un estudio conforme el tiempo más prolongado, para analizar del cambio de absorbancia del agua en el tiempo, en la región azul de espectro visible y ultra violeta.

Cabe mencionar que, en el agua municipal (Jarra 1), no fue observable el aumento de la absorbancia o inclusive la conductividad, significativamente respecto a las otras jarras, por el posible desarrollo de microorganismos. Razón por la cual, no fue observable el efecto desinfectante de los agentes utilizados. Esto puede ser causado por el aislamiento de las jarras de la luz solar, por lo que posiblemente no se hayan desarrollado colonias de bacterias fotosintéticas o algas; como en el laboratorio de instrumentación de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas (USAC, 2016). A pesar de esto, es recomendable realizar un estudio a mayor detalle del desarrollo de microorganismos, como las coliformes (Núñez *et al*, 2013), en la presencia y/o ausencia de los agentes desinfectantes propuestos.

2. Reflectividad de Tyvek. Según Asorey (2012), la radiación Vavilov-Cherenkov, producida al cruzar partículas relativistas a través del agua del detector, es reflejada y difundida por el Tyvek. Por lo que, maximiza la probabilidad de detección de los eventos en el tanque. Según Filevich (1998) es considerable que el Tyvek presente un diferente patrón de dispersión de la luz, cuando es iluminado debajo del agua. Con base en esto, se midió el cambio de la reflectividad del Tyvek a una longitud de onda específica, en el rango de emisión de la Radiación Vavilov-Cherenkov para agua municipal, agua municipal con ácido tricloroisocianúrico (107.19 ± 0.44 ppm) y agua municipal con peróxido de hidrógeno ($0.99 \pm 4.46 \cdot 10^{-3}$ mL/L). Las mediciones fueron realizadas con un láser de longitud de onda de 650nm, que según mencionado por Cherenkov (1998) corresponden a las longitudes de onda de emisión de la radiación Vavilov-Cherenkov. Además, según los resultados presentados por Filevich (1998) la intensidad relativa máxima dispersada (equivalente a la intensidad de reflexión), por el material, no es notoriamente variable para el espectro visible (**Figura 40**, Antecedentes). Los resultados obtenidos de las intensidades luminosas (Ix) respecto al ángulo de incidencia (radianes) del sensor de luz, para las mediciones realizadas de la reflexión del Tyvek, se encuentran presentan en las **Figura 71**, **Figura 72**, **Figura 73**, **Figura 74** y el resumen de los ajustes

de curvas en el Cuadro 17. El ángulo de detección fue de 0.69829 rad ($\sim 40^\circ$). En la ecuación planteada por Filevich (1998), P1 es la amplitud de campana gaussiana, P2 el centro del máximo de la campana gaussiana, P3 el ancho gaussiano y P4 es la amplitud de la función cosenoidal.

Figura 71. Arriba) Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek en el aire. Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek en el aire. Longitud de onda de medición de 650nm.

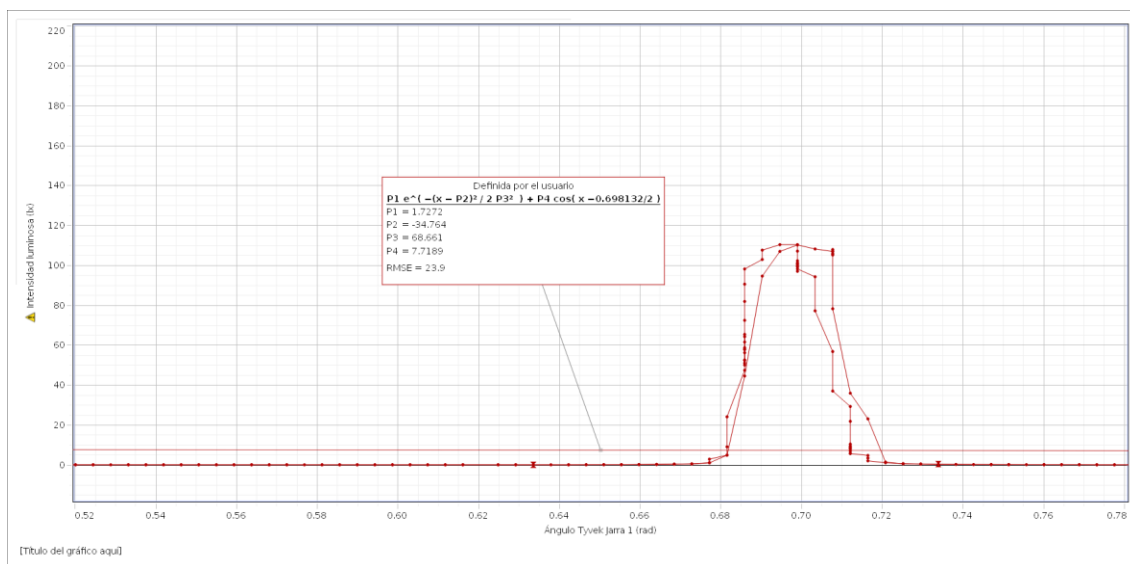
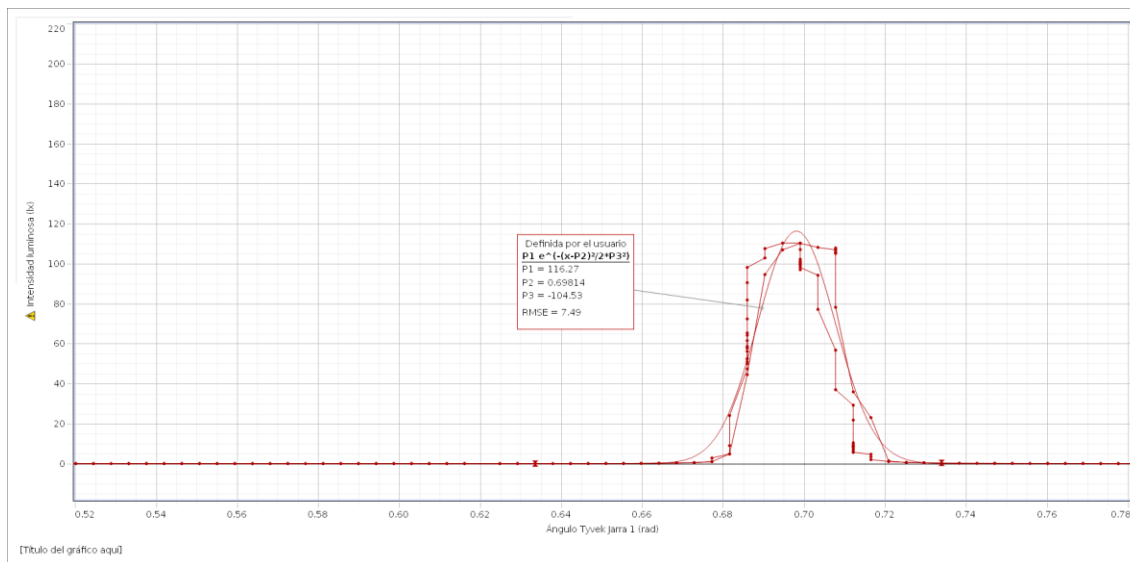


En la **Figura 71** (Cuadro 17) se muestra la intensidad luminosa (lx) detectada, de la reflexión del Tyvek en el Aire. En la imagen inferior se puede ver que el ajuste de la

curva, sobre la Ecuación propuesta por Filevich (1998), presentó una diferencia de los valores pronosticados y observados de 40.1 lx (RMSE). Además, es observable la ecuación no se ajustó a los datos, brindando una línea recta sobre los puntos. En la imagen superior, al omitirse el término cosenoidal ($P_4 = 0$) de la propuesta por Filevich (1998), el ajuste de los datos dio un RMSE de 5.60. Este valor es equivalente a ocho veces más pequeño que al tomar en cuenta P_4 , lo cual permite inferir que, al ajustarse únicamente la parte gaussiana, solo fue observable la contribución especular (brindada por la función gaussiana) y no la reflexión difusa (brindada por la función cosenoidal) del Tyvek en el Aire. Este ajuste gaussiano centró el máximo de la función en 0.70781 rad, el cual se encuentra bastante cercano al ángulo de detección de 0.69829 rad. Razón por la cual, se puede considerar que el ángulo obtenido en el ajuste gaussiano, corresponde a ángulo de la reflexión especular, y por lo tanto el Tyvek dispersó la luz en el aire según el criterio de Rayleigh, como lo descrito por Filevich (1998).

En la **Figura 72** (Cuadro 17) se puede observar la intensidad luminosa (lx) detectada, de la reflexión del Tyvek sumergido en el agua de la Jarra 1, con agua municipal. En la imagen inferior se puede ver que el ajuste de la curva, sobre la Ecuación propuesta por Filevich (1998), brinda un RMSE de 23.9 lx; formando una línea recta sobre los puntos. En la imagen superior, al omitirse el término cosenoidal ($P_4 = 0$) de la Ecuación propuesta por Filevich (1998), los valores pronosticados para la función y los obtenidos se aproximaron en 7.49 lx (RMSE). Este valor es equivalente a tres veces más pequeño que al tomar en cuenta P_4 , lo cual permite inferir el mismo comportamiento descrito para el Tyvek en el aire, en el que únicamente es observable la contribución especular de la reflexión del material. Además, el máximo de la función gaussiana se encuentra centrado en 0.69814 rad, el cual es próximo al ángulo de detección (0.69829 rad) del sensor. Convalidado lo mencionado por Filevich (1998), al mantenerse el comportamiento de dispersión de Rayleigh aún sumergido en el agua.

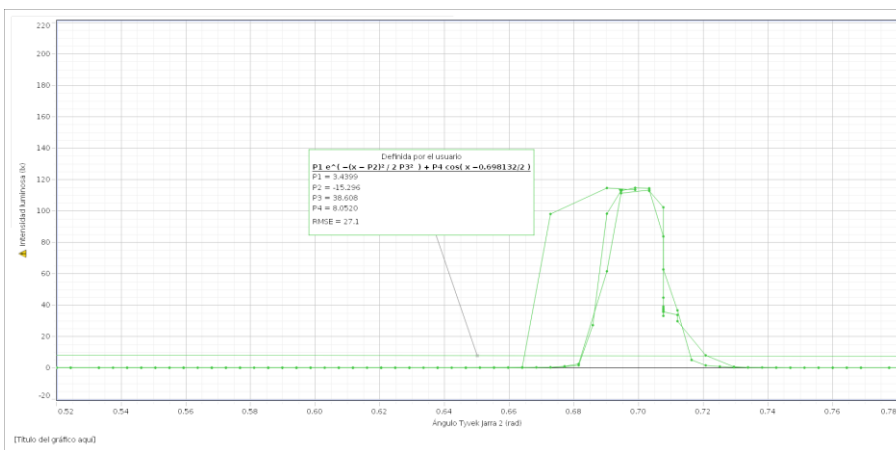
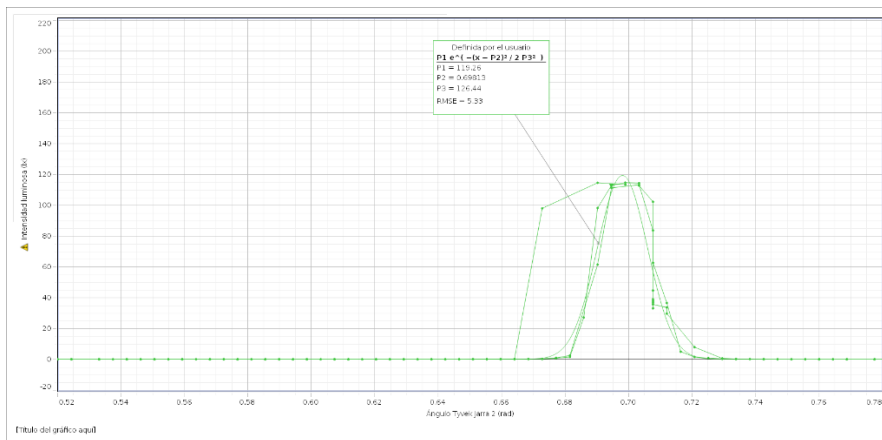
Figura 72. Arriba) Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua de Jarra 1. Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua de Jarra 1. Longitud de onda de medición de 650nm.



En la **Figura 73** (Cuadro 17) se puede observar la intensidad luminosa (I_x) detectada, de la reflexión del Tyvek sumergido en el agua de la Jarra 2, con 107.19 ± 0.44 ppm de ácido tricloroisocianúrico en agua municipal. En la imagen inferior se puede ver que el ajuste de la curva, sobre la ecuación propuesta por Filevich (1998), brinda un RMSE de 27.1 lx; dando como resultado una línea recta sobre los puntos de medición. En la imagen

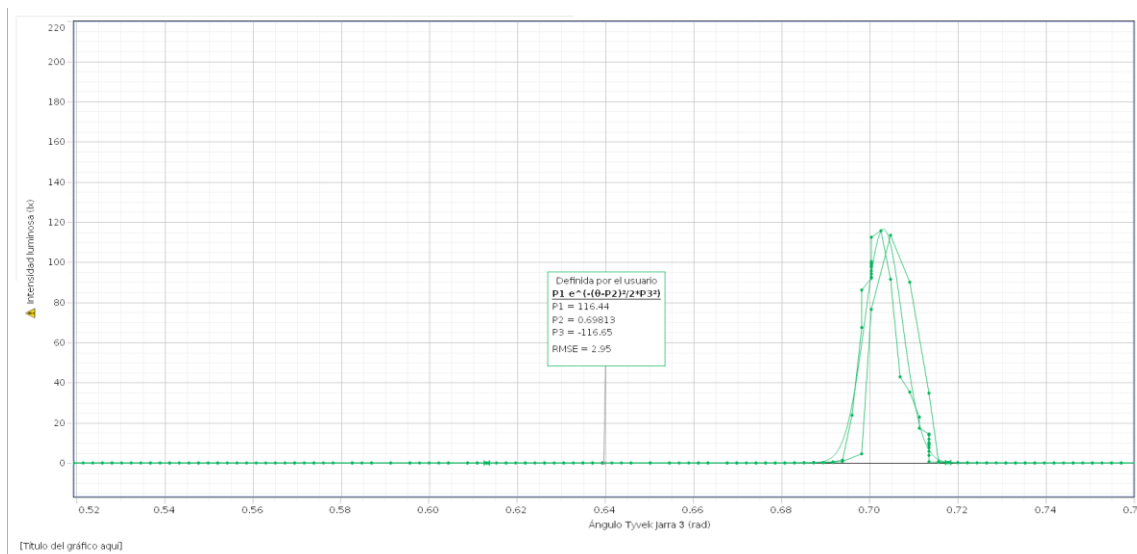
superior, al omitirse el término cosenoidal ($P_4 = 0$) de la ecuación propuesta por Filevich (1998), la ecuación predice los datos obtenidos con una diferencia de 5.33 lx (RMSE). Este valor es aproximadamente cinco veces más pequeño que al tomarse en cuenta la parte cosenoidal, lo cual reafirma lo discutido anteriormente, ya que solo fue observable la contribución especular de la reflexión del material. De forma análoga, el máximo de la función gaussiana se centró (0.69813 rad, ángulo de incidencia) cercano al ángulo de detección del sistema (0.69829 rad, ángulo de reflexión), convalidando el cumplimiento de la dispersión de Rayleigh para el Tyvek.

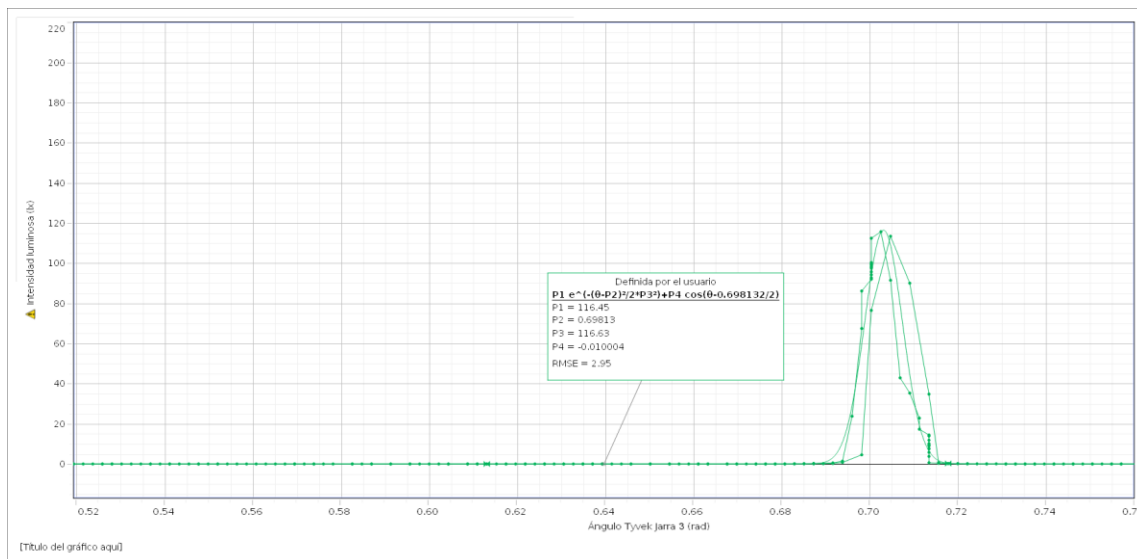
Figura 73. Arriba) Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua de Jarra 2. Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua de Jarra 2. Longitud de onda de medición de 650nm.



En la **Figura 74** (Cuadro 17) se puede observar la intensidad luminosa (lx) detectada, de la reflexión del Tyvek sumergido en el agua de la Jarra 3, con $0.99 \pm 4.46 \cdot 10^{-3}$ mL/L de H_2O_2 en agua municipal. En la imagen inferior se puede ver que, a diferencia de las otras mediciones realizadas, la parte cosenoidal presentó una mínima contribución, con una amplitud de -0.010004 lx (P_4) y un RMSE de 2.95 lx. En la imagen superior, al omitirse el término cosenoidal ($P_4 = 0$) de la Ecuación propuesta por Filevich (1998), la curva se ajustó con el mismo RMSE (2.95 lx) que al tomar en cuenta P_4 . Esto permite considerar la presencia de la reflectividad difusa por parte del Tyvek, pero al ser mínima no fue detectada en las demás corridas realizadas. Cabe mencionar que, la presencia de la contribución cosenoidal no generó cambios significativos sobre los coeficientes obtenidos para el ajuste gaussiano; por lo que puede ser un factor depreciable en las mediciones. Al igual que el Tyvek en las demás jarras y en el aire, la función gaussiana ajustada a la intensidad luminosa vrs el ángulo de incidencia centro su máximo a un ángulo (0.69813 rad) cercano al de detección (0.69829 rad). Por lo tanto, refuerza la suposición del cumplimiento del comportamiento del criterio de Rayleigh de la superficie del Tyvek, para las mediciones realizadas.

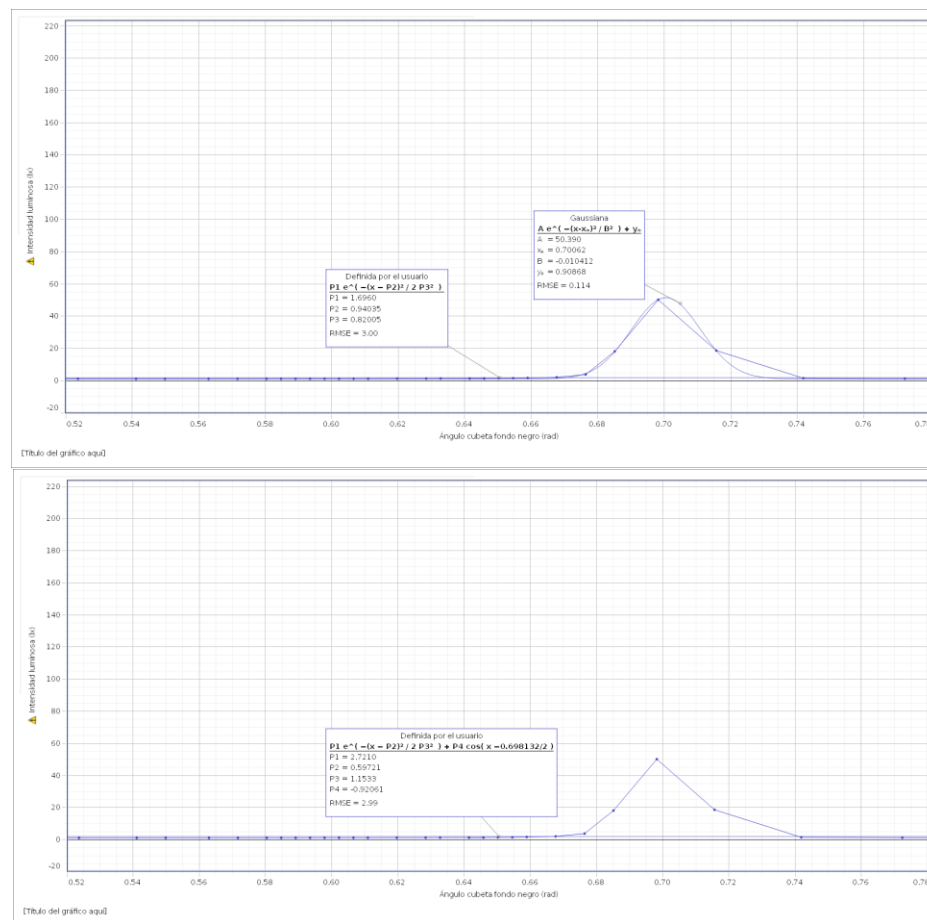
Figura 74. Arriba) Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua de Jarra 3. Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua de Jarra 3. Longitud de onda de medición de 650nm.





En la **Figura 75 (Cuadro 18)** se puede ver la intensidad luminosa (lx) vs el ángulo de incidencia (rad), de la reflexión de la ventana frontal de la cubeta plástica utilizada en las mediciones; para eliminar la reflexión de la ventana trasera esta se cubrió con vinilo de fibra de carbono DI-NOC marca 3M (**Figura 62**, izquierda). El comportamiento de los datos mostró una reflexión especular, ya que la campana se centró (0.70062 rad) cercana al ángulo de detección (0.69829 rad). El ajuste de la curva a los datos no tuvo el mismo comportamiento que en el caso de las muestras de Tyvek, ya que se ajustó a una ecuación gaussiana, que a diferencia de la propuesta por Filevich (1998) para la reflexión especular, presenta un intercepto y_0 (= 0.90868) equivalente a la intensidad inicial de la medición y la ausencia multiplicación de un medio por los valores en el exponente (**Cuadro 18**). La aproximación del ajuste de la curva brindó un RMSE de 0.114 lx generando una campana observable en la imagen superior (**Figura 75**), mientras que la función propuesta por Filevich dio RMSE de 3.00 ($P_4 = 0$, **Figura 75** imagen superior) y 2.99 ($P_4 \neq 0$, **Figura 75** imagen inferior) que generaron líneas horizontales sobre los puntos obtenidos.

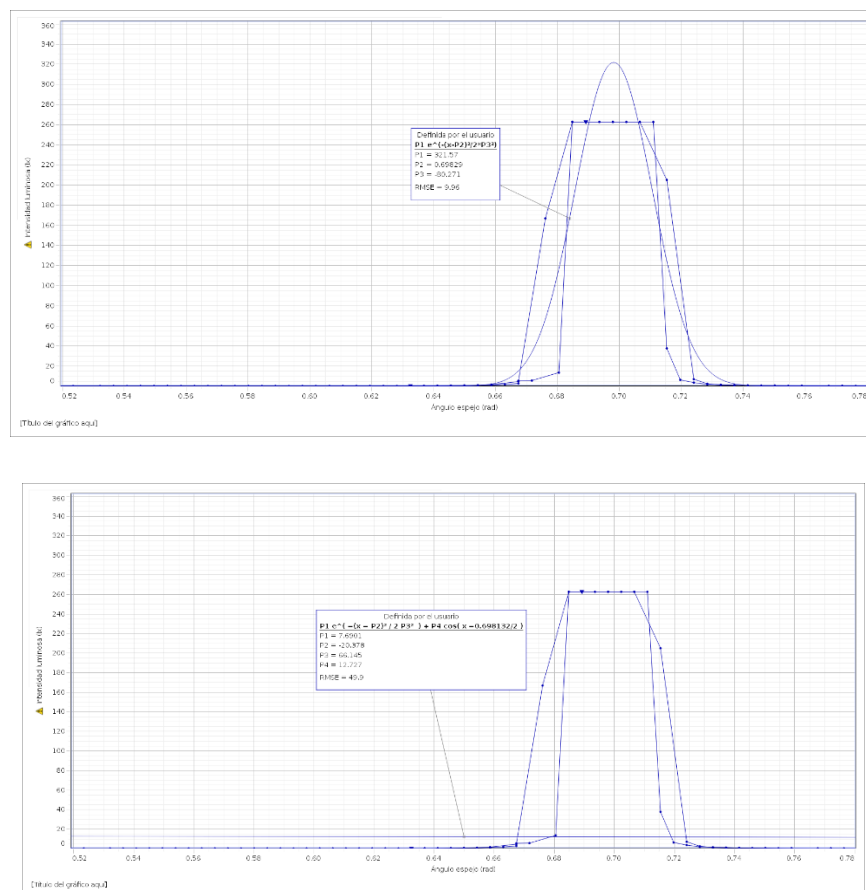
Figura 75. Arriba) Ajuste de curvas gaussianas a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia del plástico frontal de la cubeta de Spectrometer Pasco. Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia del plástico frontal de la cubeta de Spectrometer Pasco. Longitud de onda de medición de 650nm.



En el caso de la intensidad luminosa detectada por el sensor, al incidir el haz de luz sobre un espejo, se obtuvo la distribución de datos presentes en la **Figura 76** (Cuadro 17)). Al ajustar la función gaussiana y cosenoidal, brindada por Filevich (1998), se obtuvo un RMSE de 49.9 lx. Al eliminar la parte cosenoidal (propia de la reflexión difusa) los valores pronosticados se ajustaron con un RMSE de 9.96 lx, centrando a la campana (0.69829 rad) sobre el mismo ángulo de detección de 0.69829 rad; por lo que presenta congruencia con la teoría, ya que los espejos únicamente reflejan especularmente (Bauer y Westfall, 2011). Cabe mencionar que en las mediciones

realizadas a pesar de tener una diferencia de los valores pronosticados por la función y los experimentales bastante baja ($RMSE = 9.96 \text{ lx}$), el comportamiento de los datos no es completamente similar. Se puede ver que se forma una línea recta en los puntos máximos de intensidad luminosa, sin presentar puntos dispersos cercanos del máximo predicho por la función. Con base en esto, se puede inferir que el espejo tenga un umbral de reflexión máximo entre los ángulos de incidencia aproximadamente de 0.680 a 0.715 rad ($\Delta\theta = 0.035 \text{ rad} \approx 2^\circ$).

Figura 76. Arriba) Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en espejo. Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el espejo. Longitud de onda de medición de 650nm.



Con base en el Cuadro 17 y lo discutido anteriormente, es notoria la ausencia de un ajuste de la parte cosenoidal de la Ecuación propuesta por Filevich (1998) para los datos obtenidos, a pesar de trabajarse a un ángulo de $\sim 40^\circ$ ($>30^\circ$) como lo mencionado por Filevich (1998). A excepción de la Jarra 3, con peróxido de hidrógeno, con un RMSE (2.95 lx) igual que al tomar en cuenta la parte cosenoidal (RMSE = 2.95), y con coeficientes bastantes similares entre los dos ajustes para la función gaussiana. La función cosenoidal, para este caso, tuvo una amplitud de 0.010004 lx, la cual al ser mucho menor a la desviación de los datos del ajuste de la curva (RMSE) se puede considerar un término despreciable. Consecuentemente, al no ser observable el ajuste de la función cosenoidal sobre los datos o no causar un cambio significativo, se puede inferir que la reflexión difusa del Tyvek es mínima y casi despreciable en las mediciones realizadas.

Los valores de P_2 , posición angular del máximo de la campana gaussiana (Cuadro 17 y **Cuadro 18**), para las mediciones realizadas en el aire, como en el caso del Tyvek ($P_2 = 0.70781$ rad) y la cubeta de medición ($P_2 = 0.70062$ rad), presentaron valores ligeramente mayores que el ángulo de detección de 0.69829 rad. Mientras que las mediciones realizadas al sumergir el Tyvek (Cuadro 17) en el agua de la Jarra 1 ($P_2 = 0.69814$ rad), la Jarra 2 ($P_2 = 0.69813$ rad) y la Jarra 3 ($P_2 = 0.69813$ rad), el centro de las campanas gaussianas se ajustó a valores ligeramente menores al ángulo de detección. Esto puede ser explicado por el cambio del índice de refracción del medio, teóricamente el aire tiene un índice de refracción de 1 mientras que el agua de 1.3306 ($\lambda = 650.13\text{nm}$) (Segelstein, 1981), por lo que es considerable que la radiación electromagnética cambió ligeramente su distribución al ser reflejada y por lo tanto pudo causar una variación en el ángulo de reflexión especular. Los ángulos correspondientes al desplazamiento de fase (P_2) al encontrarse cercanos al ángulo de detección, los permite considerar como los ángulos incidencia θ_i y reflexión especular θ_r , respectivamente. Al ser valores cercanos ($\theta_r \approx \theta_i$), convalida el cumplimiento del criterio de dispersión de Rayleigh para la superficie del Tyvek (Filevich, 1998), para las mediciones realizadas. Este acatamiento, permite

considerar la confiabilidad de la estructura utilizada en las mediciones y los datos obtenidos.

La amplitud de las funciones gaussianas (P_1 , Cuadro 17) fueron asumidas como la intensidad luminosa del ángulo de reflexión especular, de las mediciones. La intensidad de reflexión del espejo fue obtenida de los valores máximos ($I = 260.02 \text{ lx}$) de la corrida realizada, ya que la intensidad luminosa del espejo no alcanzó el valor de 321.571 lx (P_1), de la predicción de la curva gaussiana ajustada. Este valor fue considerado como la intensidad del haz de luz incidente sobre la muestra. En el caso de la cubeta de medición (**Cuadro 18**), el ajuste gaussiano definió un máximo de 50.390 lx . Este al ser equivalente a aproximadamente la mitad de las intensidades de reflexión predichas, por las curvas gaussianas para las mediciones realizadas para el Tyvek (Cuadro 17), fue considerada significativa la contribución de la cubeta de medición a la intensidad detectada. Razón por la cual, a los valores bruidados por el ajuste de la curva para las mediciones en el Tyvek, se les sustrajo la intensidad de reflexión máxima de la ventana frontal de la cubeta (Cuadro 19, quinta columna).

Para definir la proporción de intensidad luminosa reflejada se calculó el coeficiente de reflexión R (Ecuación de coeficiente de reflexión) para cada una de las mediciones,

Cuadro 19. Se utilizó como I_r la intensidad pronosticada por el ajuste de la curva gaussiana para las mediciones y como I_o la intensidad luminosa máxima del espejo. Es importante mencionar que la cubeta brindaba una reflexión del 19.39%, este valor convalida su sustracción, ya que genera una contribución fuerte sobre las mediciones realizadas dentro de ella. El porcentaje del coeficiente de reflexión del Tyvek varió notoriamente para las mediciones realizadas en el aire y en el agua. El Tyvek en el aire presentó un valor de 51.50%. En el caso de las mediciones realizadas en el Tyvek sumergido en el agua de la Jarra 1 (control, agua municipal) se obtuvo una reflexión del 25.34%; equivalente a aproximadamente la mitad de la reflexión en el aire. Esta disminución es explicada por la atenuación de la distribución de las ondas electromagnéticas al atravesar el agua, ya que en la longitud de onda de medición el agua de esta jarra absorbe 0.148, la cual equivale a que la luz es transmitida el 71.1%. En la jarra 2 (ácido tricloroisocianúrico a $107.19 \pm 0.44 \text{ ppm}$) se obtuvo un porcentaje de

reflexión del 30.56%, semejante a una proporción de 3/2 menor que en el aire. El hecho que menguara esa proporción, de forma análoga que para la Jarra 1, puede ser explicada por la absorbancia del agua de 0.141; que determina que únicamente es transmitida un 72.2% de la luz incidente. La Jarra 3 (peróxido de hidrógeno al $0.99 \pm 4.46 \cdot 10^{-3}$ mL/L) dio como resultado un porcentaje de reflexión del 25.40%. Esto es aproximadamente la mitad del valor (al igual que para la jarra 1) obtenido en la medición en el aire, que puede ser igualmente explicado por la absorción del agua de esta jarra (de 0.140) que equivale a que la luz es transmitida únicamente un 72.4%.

En las mediciones realizadas en las jarras se obtuvieron absorbancias similares, pero coeficientes de reflexión un tanto diferente por parte de la Jarra 2. Un factor a tomar en cuenta, es el valor del porcentaje del coeficiente de reflexión de las jarras y la conductividad respectivas para cada una,

Cuadro 19. En la jarra 2, con ácido tricloroisocianuro, se obtuvo el mayor valor del coeficiente de reflexión (30.56%) de las jarras y una conductividad (250.15 ± 1 μ S/cm) mayor que las demás. Es considerable que en los medios en los que la conductividad tienda a cero la luz penetra indefinidamente, en el caso de superficies conductoras, al tener los electrones disponibles para transmitir las ondas electromagnéticas, estas son rápidamente reflejadas por el material (Griffiths, 1999). Por lo que podría inferir que los iones disponibles en la jarra hayan promovido la transmisión de la radiación electromagnética y aumentar la reflexión del material, pero este factor puede ser determinado principalmente por un factor casual que causal.

Cuadro 17. Ajuste de curvas gaussianas y funciones cosenoidales a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek; en el aire, sumergido en el agua en las diferentes jarras. Longitud de onda de medición de 650nm.

Modelo matemático	$I_r(\theta, \theta_i) = P_1 \exp\left(-\frac{(\theta - P_2)^2}{2P_3^2}\right)$			RMSE	$I_r(\theta, \theta_i) = P_1 \exp\left(-\frac{(\theta - P_2)^2}{2P_3^2}\right) + P_4 \cos\left(\theta - \frac{\theta_i}{2}\right)$				RMSE
	P1 (lx)	P2 (Rad)	P3 (Rad)		(lx)	P1 (lx)	P2 (Rad)	P3 (Rad)	
Espejo ^a Figura 76	321.57	0.69829	80.271	9.96	7.6901	20.378	66.145	12.727	49.9
Tyvek en el aire Figura 71	184.29	0.70781	103.04	5.60	9.7839	-6.1509	31.578	15.037	40.1
Tyvek Jarra 1 Figura 72	116.27	0.69814	104.53	7.49	1.7272	-34.764	68.661	7.7189	23.9
Tyvek Jarra 2 Figura 73	119.26	0.69813	126.44	5.33	3.4399	-15.296	38.608	8.0520	27.1
Tyvek Jarra 3 Figura 74	116.44	0.69813	116.65	2.95	116.45	0.69813	116.63	- 0.010004	2.95

a =se utilizó un espejo para detectar la intensidad luminosa del haz de luz incidente.

RMSE = raíz cuadrada de la desviación (por sus siglas en ingles), utilizada para analizar la diferencia entre valores predichos por un modelo o una estimación y los valores observados.

Las mediciones fueron realizadas dentro de una cubeta plástica del Spectrometer Pasco con el sensor de luz ajustado a 0.69829 rad (~40°).

Cuadro 18. Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia sobre la cubeta plástica del Spectrometer Pasco. Longitud de onda de medición de 650nm.

Modelo matemático	$I_r(\theta, \theta_i)$ $= P_1 \exp\left(-\frac{(\theta - P_2)^2}{2P_3^2}\right)$			RMSE	$y = A \exp\left(-\frac{(X - X_o)^2}{B^2}\right) + Y_o$				RMSE
	P1 (lx)	P2 (Rad)	P3 (Rad)		(lx)	A (lx)	Xo (rad)	B (Rad)	
Cubeta de estudio Figura 75	1.6960	0.94035	0.82005	3.00	50.390	0.70062	0.010412	0.90868	0.114

Cuadro 19. Intensidad relativa máxima, reflectividad y condiciones experimentales de Tyvek en el aire, sumergido en el agua en las diferentes jarras, agua ultra pura y el agua en el tanque del detector (tratada con alumbre y H2O2). Longitud de onda de medición de 650nm.

	Conductividad (10X Probe) ± 1 $\mu\text{S/cm}$ a 24.04 ± 0.01 °C	Absorbancia (A) de agua (± 0.001) a λ $= 650.023$ nm	% de Transmitancia del agua (%T=100*10 ^{-A} ± 0.001)	Intensidad relativa máxima ^a (± 0.01 lx)	% Coeficiente de reflexión (%R)
Tyvek en el aire ^b	N/A	N/A	N/A	133.90	51.50%
Tyvek Jarra 1 ^b	189.90	0.148	71.1%	65.88	25.34%
Tyvek Jarra 2 ^b	250.15	0.141	72.2%	79.46	30.56%
Tyvek Jarra 3 ^b	198.66	0.140	72.4%	66.05	25.40%
Espejo ^c	N/A	N/A	N/A	260.02	100%
Cubeta de medición ^b	N/A	N/A	N/A	50.39	19.39%

a = La intensidad relativa máxima fue obtenida del máximo de la función gaussiana ajustada a los datos. Los ajustes que involucraban la función cosenoidal no presento un RMSE que permitiera considerarlo como un modelo confiable de medición, por lo que no fueron tomados en cuenta.

b = Al valor de la intensidad relativa máxima se le resto la intensidad de reflexión del plástico de la cubeta de medición.

c = por el hecho que la intensidad luminosa del espejo no alcanzó el valor de 321.57 lx, como el ajuste de curva predice como máximo de intensidad, se tomó el valor máximo de las mediciones realizadas para esta corrida.

3. Índice de refracción. Para la emisión de la radiación Vavilov-Cherenkov se debe cumplir la conservación del momentum del foton emitido, en el que la frecuencia natural del medio sea nula (Ecuación. $\frac{nv}{c} \cos\theta = 1$) (Cherenkov, 1958). Razón por la cual la generación de esta radiación es completamente dependiente del índice de refracción del medio en el que se distribuye. Por lo que se midió el cambio del índice de refracción a una longitud de onda específica, en el rango de emisión de la Radiación Vavilov-Cherenkov, agua municipal, agua municipal con ácido tricloroisocianúrico (100 ± 0.001 ppm) y agua municipal con peróxido de hidrógeno (1 ± 0.05 mL/L). Las soluciones fueron preparadas previamente a las mediciones, ya que no se pretendía analizar el efecto del tiempo sobre el índice de refracción. Las mediciones fueron realizadas con una lámpara D-sodio (589.3nm), la cual forma parte de longitud de onda de emisión de la radiación Vavilov-Cherenkov (Cherenkov, 1958). Los resultados obtenidos se encuentran en el **Cuadro 20**.

En las muestras de agua ultra-pura y el agua municipal el índice de refracción para ambos fue de 1.333 ± 0.000 (**Cuadro 20**), similar al teórico del agua 1.333 ($\lambda=590$ nm) (Segelstein, 1981). En el caso de la solución de ácido tricloroisocianúrico se obtuvo una diferencia en el cuarto decimal respecto al del agua, con un valor de 1.3335 ± 0.0001 . La solución de peróxido de hidrógeno mostró una disminución en el tercer y cuarto decimal en relación al índice de refracción del agua, con un valor de 1.3325 ± 0.0001 . El agua en el tanque del detector brindó el mismo valor del índice de refracción que para la solución de peróxido de hidrógeno con un valor de 1.3325 ± 0.0001 . Consecuentemente, se puede inferir que el peróxido de hidrógeno permite una disminución del índice de refracción del medio, por lo que es considerable como un buen medio de generación de radiación Cherenkov; al igual que lo obtenido por Quishpe *et al* (2015). Una consideración importante es la relación del índice de refracción con la constante dieléctrica y la conductividad del medio (Griffiths, 1999, Ecuaciones 12, 14). Esto permite inferir que la generación de iones en el medio causa un aumento en la conductividad de la solución de tricloro (en las jarras este mismo reactivo generó los mayores valores de conductividad), razón por la cual explicaría el aumento ligero en el valor del índice de refracción. Cabe mencionar que las diferentes muestras de agua al presentar umbrales de velocidad

(Cuadro 20), de partículas en el medio para generar radiación Vavilov-Cherenkov, bastante similares, permiten considerar que todas permitirían la detección de las mismas partículas relativistas en el detector; las cuales deberán moverse arriba del 75% de la velocidad de la luz (en el vacío), ya que solo cumpliendo esta condición se podrá generar la radiación Vavilov-Cherenkov en el medio.

Cuadro 20. Índice de refracción de agua con Tricloro, agua oxigenada, agua ultra pura y agua de tanque (tratada con alumbre y agua oxigenada).

	Solución de 100±0.001 ppm Ácido tricloroisoci anúrico	Solución 1±0.05mL/L H ₂ O ₂	Agua ultra pura	Agua municipal	Agua en el tanque de detección (con Alumbre y H ₂ O ₂)
n^D ±0.0001	1.3335	1.3325	1.3330	1.3330	1.3325
β_{min}^a = v/c = 1/ n	0.7499	0.7505	0.7502	0.7502	0.7505

a = umbral de velocidad de partículas en el medio para generar radiación Vavilov-Cherenkov
Lámpara de D-Sodio: longitud de onda de medición 589.3nm

4. Tanque de detección

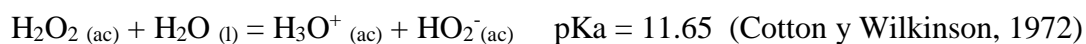
a. **Turbidez, pH, conductividad.** Se buscó optimizar los costos al utilizarse agua municipal con sulfato de aluminio granulado Tipo B, requerido para la coagulación de material coloidal disuelto en el agua; por lo que se definió la proporción óptima del coagulante a utilizar para el agua en el tanque del detector con base en la turbidez. Según Núñez *et al* (2013), cuando el agua tiene una turbidez menor a uno, la dosis de floculante es entre 8 a 10 ppm y es importante hacer una la valoración de pH, por la dependencia de la reacción del sulfato de aluminio de este factor (Glynn y Heike, 1999). Se menciona que no es necesario tratamiento de filtrado o decantación, únicamente mezclar 100 rev/min durante una hora y posteriormente ser mantenidas en reposo para su utilización en el detector WCD. El agua municipal presentó una turbidez de 0.36 ± 0.01 NTU (**Figura 78**), razón por la cual se utilizó la proporción de sulfato aluminio de 10.422 ± 0.01 ppm. Con base en el pH de 7.21 ± 0.1 ($\text{pH} > 6$) (**Figura 78**) del agua municipal, se consideró el ambiente propicio para llevar a cabo la coagulación (Glynn y Heinke, 1999).

Se optó a realizar una decantación por gravedad, para eliminar completamente del tanque los floculos generados, así se podían evitar los efectos de atenuación de la radiación electromagnética, generada por la presencia de especies absorbentes. Un ejemplo de estas especies es uno de los productos iniciales de la floculación, el hidróxido de aluminio. Este es un anfótero que en presencia de ácidos fuertes actúa como una base débil y en presencia de las bases fuertes actúa como un ácido débil y es muy poco soluble en agua, pero solo en la presencia de ácidos o bases fuertes se producen iones solubles. En los sistemas con hidróxido de aluminio en pH de 8 a 12 las especies principales parecen ser un polímero con Al octahédrico y puentes de hidrógeno con el OH (Cotton y Wilkinson, 1972). Además, esta especie ayuda a neutralizar los coloides en la floculación, por lo que adsorbe los iones positivos en la solución (Glynn y Heinke, 1999). Por lo que se consideró que la formación de esta especie generaría flóculos que evitarían la distribución de la radiación Vavilo-Cherenkov.

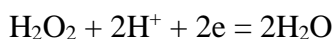
El caudal del agua generado en el tanque fue de 0.00818 L/s por 30 min, el cual fue observablemente como un flujo turbulento, por la presión hidrostática que generó la

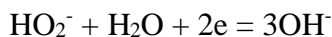
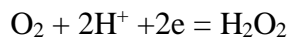
entrada de agua del segundo nivel; permitiendo una homogeneidad en la solución. Además, este flujo permitió inferir que fue brindada la suficiente energía mecánica para alcanzar la energía de activación de la reacción de los carbonatos y el sulfato de aluminio; ya que permitió la difusión de los átomos y su colisión para llevar a cabo la reacción. Después de las 24 horas de reposo del agua, se tomó una muestra de agua, la cual presentó un aumento en el pH a 7.37 ± 0.1 (**Figura 78**), en comparación a valor inicial. Esto es contrario a lo esperado, ya que al completarse la reacción, los carbonatos de calcio que brindaban dureza y alcalinidad al agua pasarían a convertirse en sulfato de calcio y por lo tanto disminuyendo el pH (Glynn y Heinke, 1999). Cabe mencionar que la turbidez del agua aumentó por el hecho de agregar el alumbre llegando a un valor de 2.64 ± 0.01 NTU; el cual pudo ser causado por la formación de floculos por el hidróxido de aluminio, que no lograron ser removidos al decantar.

En la conductividad (**Figura 77**) del agua municipal, previa al tratamiento, y al agregar el floculante es observable cierta diferencia entre los valores. Para el agua municipal se tuvo una conductividad de $160.42 \pm 1 \mu\text{S}/\text{cm}$ y para el agua tratada con alumbre fue de $177.22 \pm 1 \mu\text{S}/\text{cm}$, un aumento de aproximadamente 17 unidades. Estos valores son equivalentes a 80.21 ppm de TDS y 88.61 ppms de TDS (Ecuación de TDS), por lo que es considerable que ciertos floculos no hayan sido completamente removidos del agua al decantar, aumentando la conductividad por la presencia de iones de la reacción de floculación. Al agregarle el peróxido de hidrógeno como agente desinfectante se obtuvo un aumento en la conductividad, pH y Turbidez a $200.92 \pm 1 \mu\text{S}/\text{cm}$, 7.60 ± 0.1 y 2.67 ± 0.01 NTU, respectivamente. El cambio en el pH y el aumento de la conductividad pueden ser explicado por el hecho que el peróxido de hidrógeno es ligeramente más ácido con el agua:



Y por su baja estabilidad termodinámica (mencionada anteriormente). Además, los productos y el mismo peróxido de hidrógeno reaccionan mediante oxido-reducciones en soluciones acuosas:





(Cotton y Wilkinson, 1972)

Al formar hidróxilos como parte de su reacción y neutralizar los iones hidrónios, es considerable el aumento del pH en la dilución.

El agua ultra pura fue utilizada como un parámetro comparativo de la calidad del agua. Los resultados obtenidos para esta muestra permiten confirmar que la presencia de diferentes contaminantes en el agua, causan un aumento ligero en el pH, conductividad e inclusive en la turbidez. Para la conductividad, es observable gráficamente (**Figura 77**) que la diferencia de la conductividad medida para el agua ultra pura ($13.70 \pm 1 \mu\text{S}/\text{cm}$) y las demás muestras es de aproximadamente 100 unidades. En el caso de turbidez (0.17 ± 0.01 NTU), se obtuvo aproximadamente la mitad de del valor obtenido para el agua municipal (2.64 ± 0.01 NTU), re-convalidando la presencia de sólidos en suspensión presentes en el agua municipal. En el caso del pH (**Figura 78**) del agua ultra-pura (7.03), por los tratamientos en la que es sometida, se puede inferir que no presenta especies que diera como resultado un aumento en el pH como en el agua tratada con alumbre (pH = 2.64) o al añadir peróxido de hidrógeno de (7.60) o inclusive en el agua municipal (pH = 7.21). Cabe mencionar que, la consistencia en las temperaturas de las mediciones permite considerar la comparabilidad y confiabilidad de las mediciones realizadas.

Figura 77. Valores promedios y desviación estándar de las mediciones de conductividad y temperatura realizadas al agua ultra pura, agua municipal, agua decantada con alumbre y agua decantada con alumbre (10.422 ±0.01 ppm) y peróxido de hidrógeno (600 ±5mL).

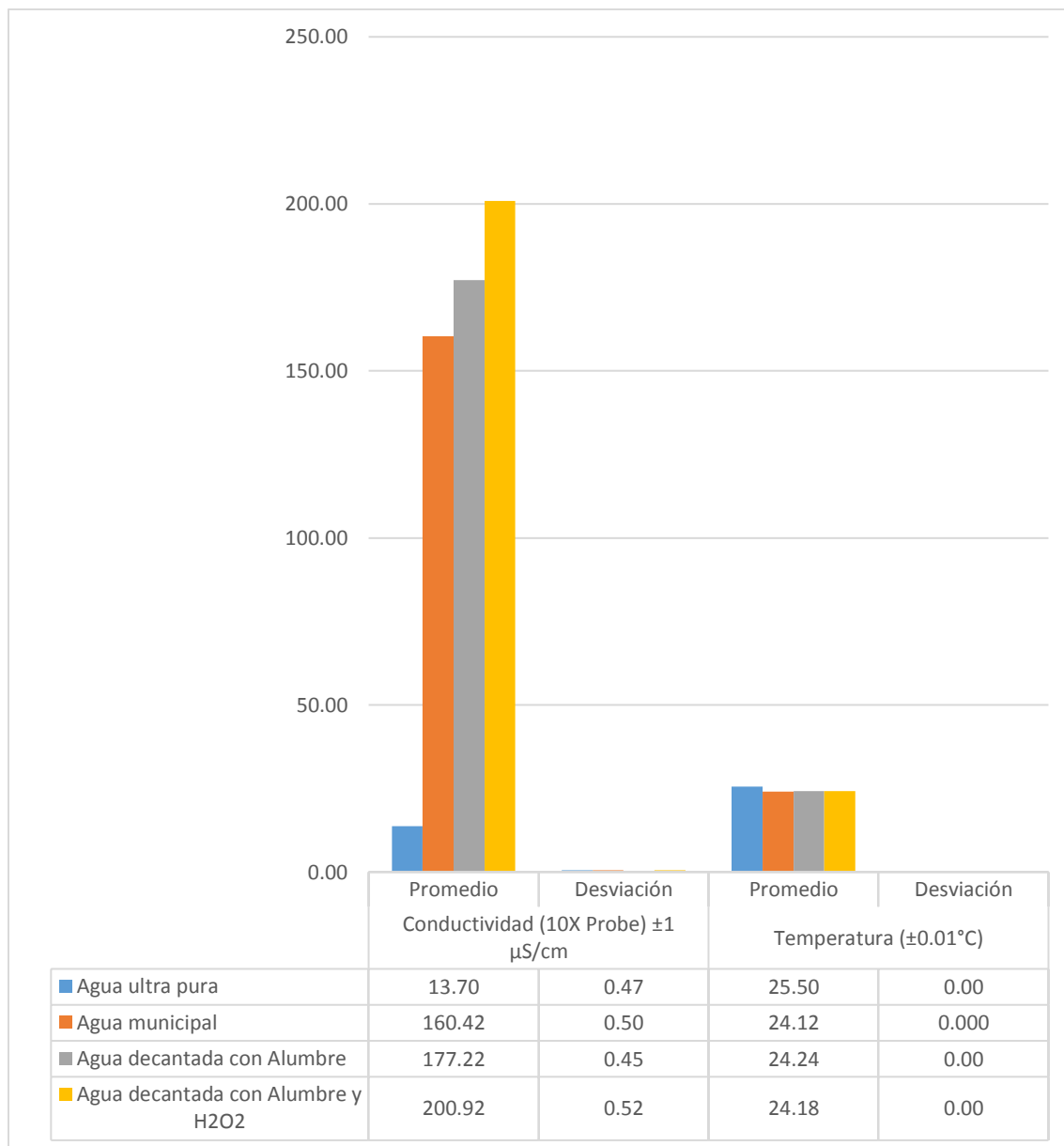
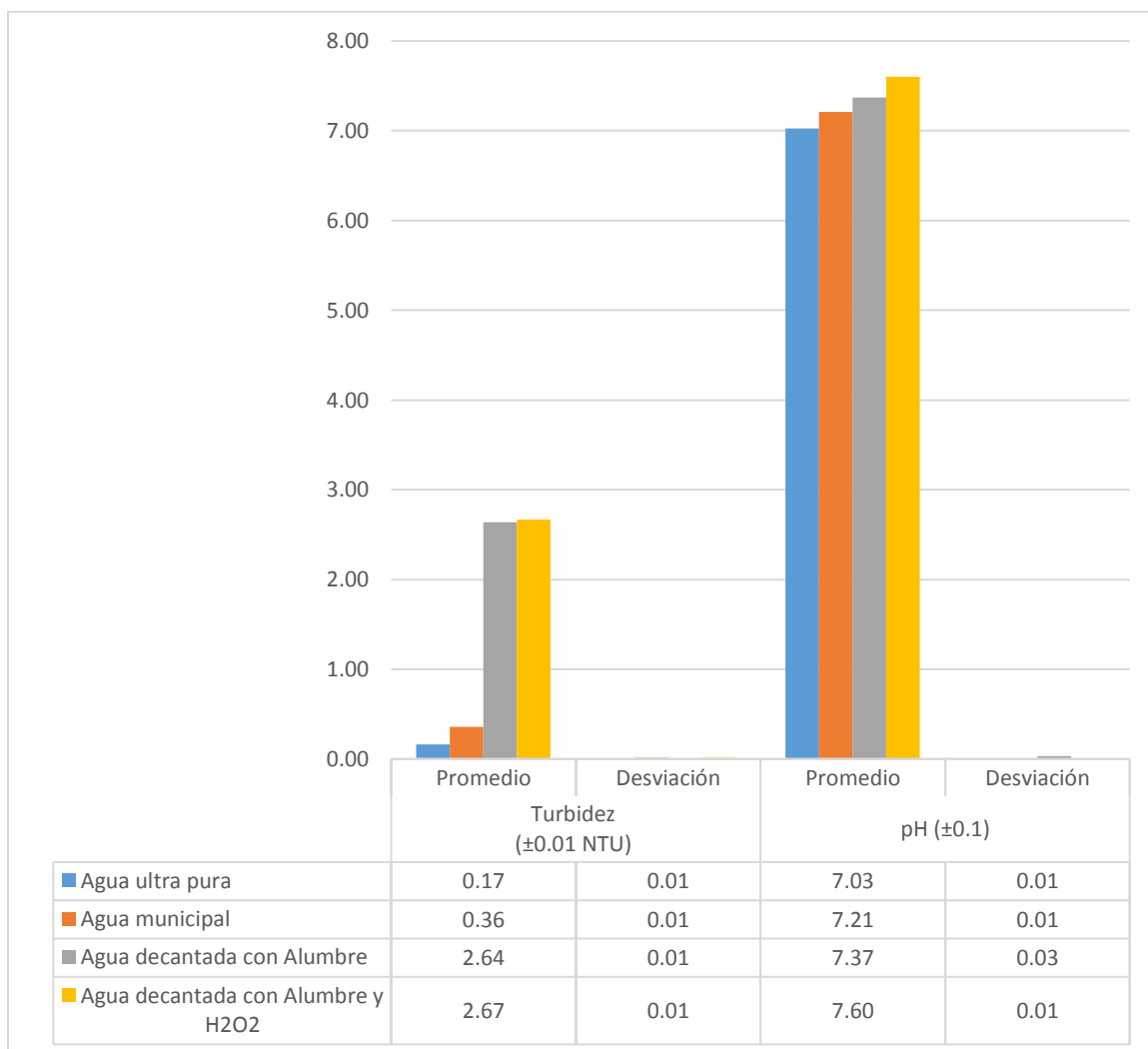


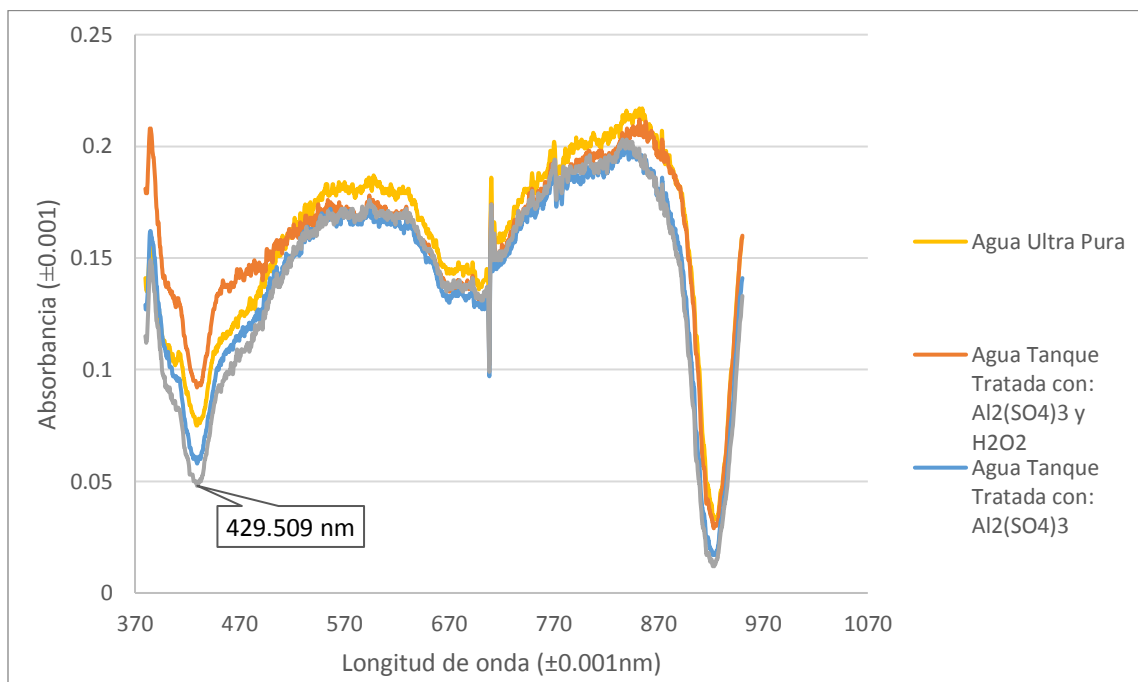
Figura 78. Valores promedios y desviación estándar de las mediciones de turbidez y pH (temperatura de medición Figura 40) realizadas al agua ultra pura, agua municipal, agua decantada con alumbre y agua decantada con alumbre (10.422 ±0.01 ppm) y peróxido de hidrógeno (600 ±5mL).



b. Absorbancia. Información cuantitativa referente a los diferentes parámetros de detección de partículas atravesando el WCD, son obtenidas midiendo la intensidad de la radiación Vavilov-Cherenkov para cada evento. Razón por la cual, es importante asegurar que el PMT colecte la mayor cantidad de luz generada (Filevich, 1999). Esto permite tomar en cuenta la absorbancia del medio en los WCD, para considerar el efecto de la atenuación de la luz por la presencia de partículas absorbentes. La comparación de las absorbancias del agua municipal, el agua tratada con alumbre, el agua tratada con alumbre y H₂O₂ (colocada en el tanque del detector) y agua ultra pura se encuentra en la **Figura 79**.

En la **Figura 79**, en la región 379.940 y 500.320 nm (UV y azul del espectro visible) se pueden ver variaciones respecto a las absorbancias asignadas a las diferentes muestras de agua. La menor absorbancia en esta región es observable para el agua municipal, seguida por el agua tratada con alumbre, el agua ultra pura y la más alta de todas, el agua tratada con alumbre y peróxido de hidrógeno. Esta región es considerablemente de interés, ya que pertenece a la longitud de onda de emisión del cono externo de la radiación Vavilov-Cherenkov, el cual se encuentra entre la región UV-azul del espectro VIS (Cherenkov, 1958). Es considerable que la posición de los mínimos en esta región (429.509 nm) sea de primordial interés, ya que se encuentra cercana a la longitud de onda de la longitud de onda de máxima respuesta del PMT, 420 nm (Hamamatsu Photonics, 2013). Tomando en cuenta los mínimos de esta región se obtiene que para el agua municipal es posible la transmitancia de un máximo del 89% (*Abs* ~0.05) de la luz. En el caso del agua tratada con sulfato de aluminio la luz puede ser transmitida a un 87% (*Abs* ~0.06), pero al tener presente peróxido de hidrógeno la transmitancia de la luz se redujo al 81% (*Abs* ~0.09). Mientras que, para el agua ultra pura, la transmitancia fue del 83% aproximadamente. Al mantenerse en rango similares es considerable que las diferentes muestras de agua no absorban significativamente en esta región. Cabe mencionar que, a pesar de no presentar absorciones con cambios abruptos, es importante notar que las turbideces de cada una de las muestras fueron completamente diferentes (**Figura 78**).

Figura 79. Absorbancia de agua ultra pura, agua en el tanque de detección tratada con alumbre (10.422 ± 0.01 ppm), agua en el tanque de detección tratada con alumbre (10.422 ± 0.01 ppm) y peróxido de hidrógeno (600 ± 5 mL) y agua municipal antes de tratar. Las mediciones fueron realizadas en un rango espectral de $379.940 - 950.206 \pm 0.001$ nm. La línea negra y el punto señalado corresponden a la longitud de onda del mínimo de las absorbancias de las mediciones realizadas.



c. Reflectividad de Tyvek. La intensidad luminosa (lx) detectada a diferentes ángulos de incidencia, para el Tyvek sumergido en agua ultra pura, se encuentra presente en la **Figura 80** (resumen de datos **Cuadro 21**). En la imagen inferior se puede ver que el ajuste de la curva, sobre la Ecuación propuesta por Filevich (1998), presentó un RMSE de 16.9 lx. Además, es observable que esta ecuación no se ajustó a los puntos, ya que generó una línea recta sobre ellos. En la imagen superior, al omitirse la función cosenoidal ($P4 = 0$), se obtuvo un RMSE de 5.58, aproximadamente tres veces menor que para la otra ecuación. En esta misma imagen, se puede ver la formación de la curva gaussiana sobre los puntos y el centro del máximo de la campana en 0.698 rad. Al estar este valor cercano al ángulo de detección de 0.69829 rad, vuelve a mostrar el cumplimiento del criterio de dispersión de Rayleigh (como lo descrito anteriormente).

La intensidad luminosa (lx) detectada en el sensor a diferentes ángulos de incidencia, para el Tyvek sumergido en el agua utilizada dentro del tanque del detector Kinich Ahau, se encuentra presente en la **Figura 81** (resumen de datos **Cuadro 21**). El agua en el tanque fue tratada con sulfato de aluminio (agente floculante) y peróxido de hidrógeno (agente desinfectante). En la imagen inferior se puede ver que el ajuste de la curva, sobre la Ecuación propuesta por Filevich (1998), presentó una diferencia de los valores pronosticados y obtenidos de 34.9 lx (RMSE). Además, es observable que esta ecuación no se ajustó a los puntos, ya que generó una línea recta sobre ellos. En la imagen superior, al prescindir de la función cosenoidal ($P_4 = 0$), se obtuvo un RMSE de 12.2 lx; equivalente a la tercera parte del RMSE tomando la ecuación cosenoidal. Asimismo, es observable que la campana gaussiana se ajustó al comportamiento de los datos. En este ajuste se obtuvo un corrimiento de la campana en 0.69813 rad (P_2), cercano al ángulo de detección de 0.69829 rad. Esto permite considerar la igualdad entre el ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión (detectado por el sensor), y por lo tanto se cumple el criterio de dispersión de Rayleigh (como lo demostrado en las jarras para el Tyvek).

Esta medición fue realizada para analizar el cambio del comportamiento de la luz en relación de agua completamente purificada y el agua tratada utilizada en el tanque del detector. Al igual que en las jarras, la ausencia del ajuste sobre la parte cosenoidal de la Ecuación propuesta por Filevich (1998), en los datos, a pesar de trabajarse a un ángulo mayor que 30° , como lo mencionado por Filevich (1998), no fue observable la contribución de la reflexión difusa en las mediciones realizadas. En el **Cuadro 21** se puede ver que la amplitud gaussiana brindada por la función ajustada, del agua ultra pura (113 lx) fue 11.73 lx menor que el agua tratada con alumbre y peróxido de hidrógeno (124.73 lx). De forma análoga al análisis realizado para la reflectividad del Tyvek para las jarras, se asumió que la amplitud gaussiana (P_1) correspondía a la intensidad luminosa en el ángulo de reflexión especular, se utilizó el espejo para definir la intensidad incidente y se eliminó la intensidad luminosa de la cubeta.

Figura 80. Arriba) Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada respecto al ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua ultra pura. Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua ultra pura. Longitud de onda de medición de 650nm.

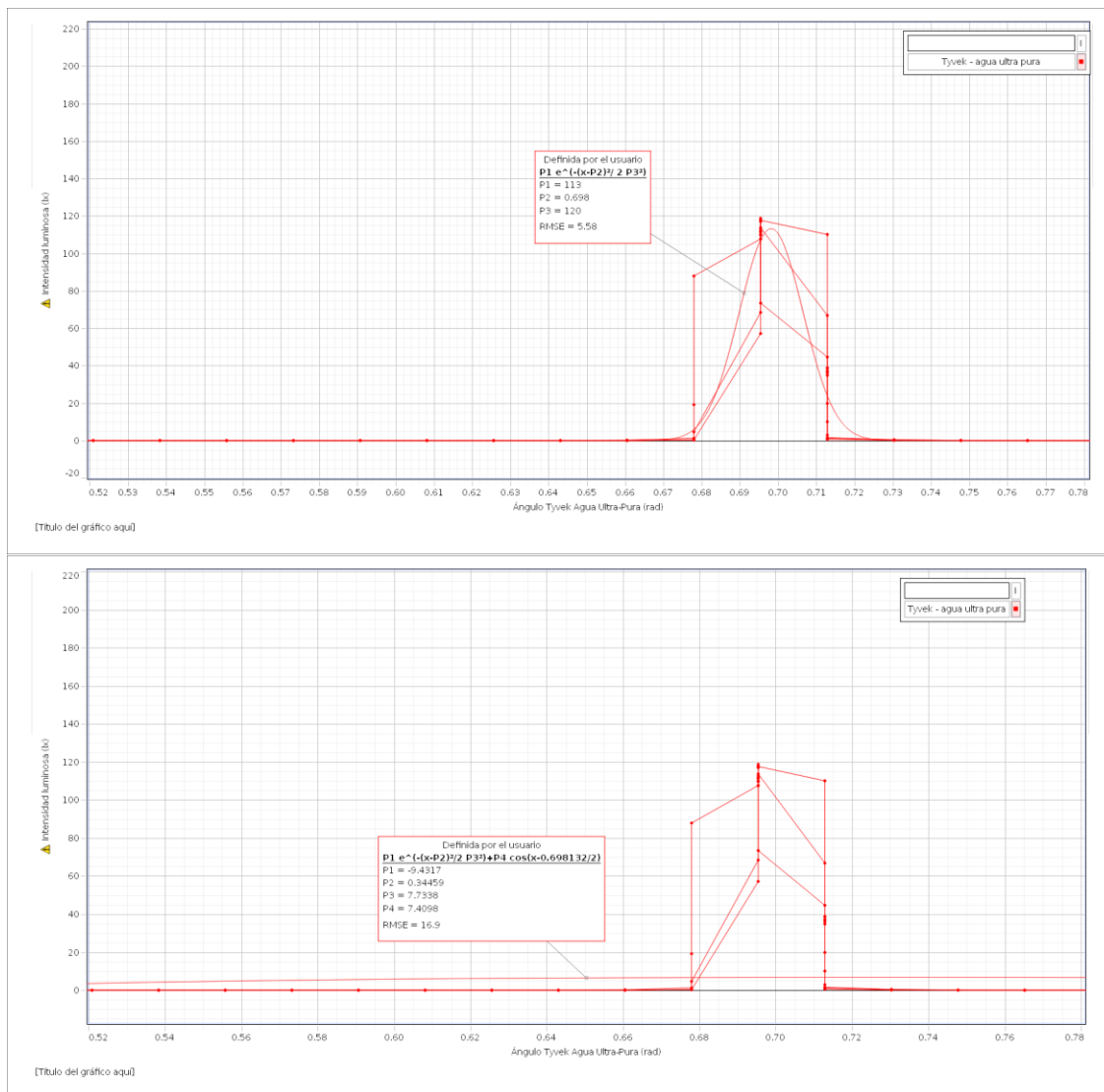
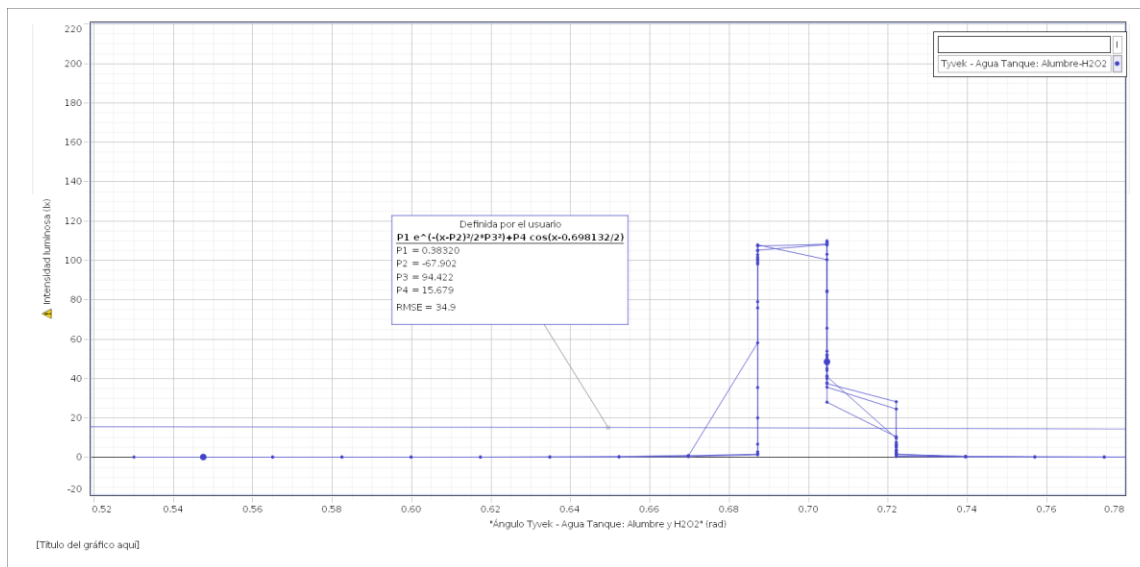
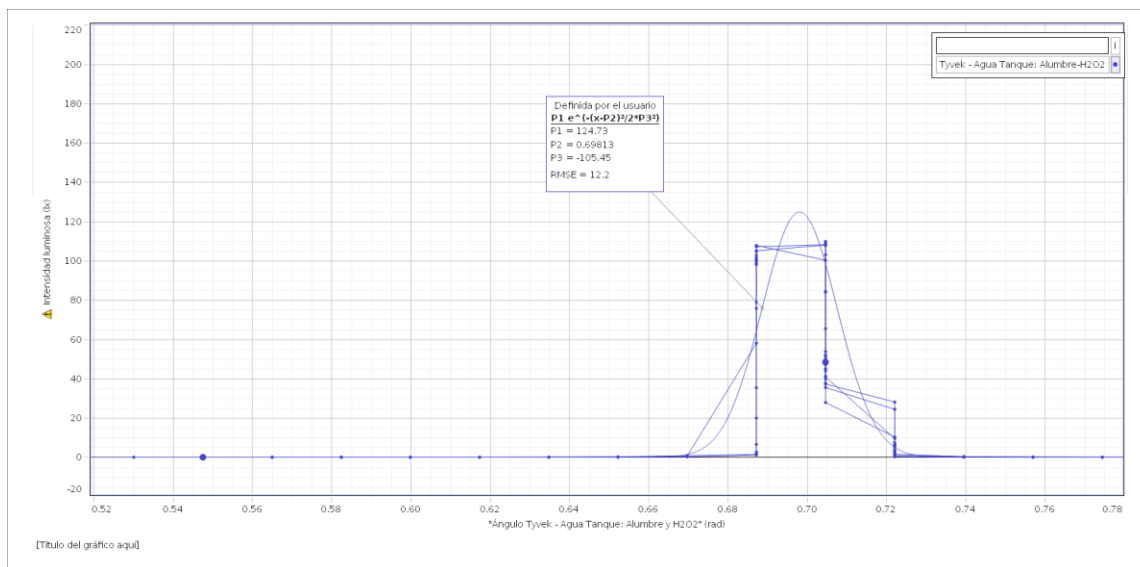


Figura 81. Arriba) Ajuste de curva gaussiana a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua del tanque del detector, tratada con Alumbre y H2O2. Abajo) Ajuste de curva gaussiana y función cosenoidal a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek sumergido en agua del tanque del detector, tratada con Alumbre y H₂O₂.



Cuadro 21. Ajuste de curvas gaussianas y funciones cosenoidales a la intensidad de luz detectada vrs ángulo de incidencia en el Tyvek; sumergido en el agua en el tanque del detector (tratada con alumbre y H₂O₂). Longitud de onda de medición de 650nm.

Modelo matemático	$I_r(\theta, \theta_i)$ $= P_1 \exp\left(-\frac{(\theta - P_2)^2}{2P_3^2}\right)$			RMSE	$I_r(\theta, \theta_i) = P_1 \exp\left(-\frac{(\theta - P_2)^2}{2P_3^2}\right) + P_4 \cos\left(\theta - \frac{\theta_i}{2}\right)$				RMSE
	P1 (lx)	P2 (rad)	P3 (rad)		(lx)	P1 (lx)	P2 (rad)	P3 (rad)	
Tyvek agua en Tanque del detector, tratada con Alumbre y H ₂ O ₂	124.73	0.69813	105.45	12.2	0.38320	-67.902	94.422	15.679	34.9
Tyvek agua ultra pura	113	0.698	120	5.58	-9.4317	0.34459	7.7338	7.4098	16.9

*Las mediciones fueron realizadas dentro de una cubeta plástica del Spectrometer Pasco

Los coeficientes de reflexión porcentuales definidos para las mediciones realizadas sobre el Tyvek se encuentran presentes en el **Cuadro 22**. En el caso del agua ultra pura se obtuvo un valor de 24.08%, el cual fue menor al del Tyvek sumergido en el agua tratada dentro del tanque, de 28.59%. El agua ultra pura presentó una absorbancia para esta región de 0.163, esto significa que permite la transmisión del 68.7% de la luz emitida a la longitud de onda de medición (650.023nm). Mientras que el agua, dentro del tanque de detección, presentó una absorbancia de 0.152, equivalente a la transmisión del 70.5% de la luz en el agua. Mostrándose un mínimo aumento en la transmisión del agua, que podría explicar el aumento del porcentaje del coeficiente de reflexión. Además, vuelve a observarse el mismo patrón que el caso de las jarras, en el que el medio con mayor conductividad (el agua tratada dentro del tanque, $200.92 \pm 1 \mu\text{S/cm}$, **Cuadro 22**) mostró un aumento en el coeficiente de reflexión. Es considerable realizar un estudio a mayor detalle sobre la correlación entre estas variables en los líquidos, pero en el presente documento se seguirá infiriendo un efecto de la casualidad y no necesariamente causal.

Cuadro 22. Intensidad relativa máxima y reflectividad experimental de Tyvek sumergido en el agua en el tanque del detector (tratada con alumbre y H₂O₂). Longitud de onda de medición de 650nm.

	Conductividad (10X Probe) $\pm 1 \mu\text{S/cm}$ a $24.04 \pm 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$	Absorbancia (A) de agua (± 0.001) a $\lambda = 650.023 \text{ nm}$	% de Transmitancia del agua ($T = 100 * 10^{-A \pm 0.001}$)	Intensidad relativa máxima ^a ($\pm 0.01 \text{ lx}$)	% Coeficiente de reflexión (%R)
Tyvek agua en Tanque, tratada con Alumbre y H ₂ O ₂	200.92	0.152	70.5%	74.34	28.59%
Tyvek agua ultra pura ^b	13.70	0.163	68.7%	62.61	24.08%

a = La intensidad relativa máxima fue obtenida del máximo de la función gaussiana ajustada a los datos. Los ajustes que involucraban la función cosenoidal no presento un RMSE que permitiera considerarlo como un modelo confiable de medición, por lo que no fueron tomados en cuenta.

b = Al valor de la intensidad relativa máxima se le restó la intensidad de reflexión del plástico de la cubeta de medición.

d. Análisis de señal. Por las características descritas anteriormente es considerable que para conocer el efecto de ellas en la emisión de la radiación Vavilov-Cherenkov es necesario analizar los pulsos detectados por el fotomultiplicador en el medio. Por consiguiente, se realizó un estudio de la señal detectada de Radiación Vavilov-Cherenkov por el fotomultiplicador (PMT) sumergido en el agua del tanque del detector y fuera de este. La experimentación de la corrida realizada sin sumergir el PMT fue denominada: medición en el aire, la cual fue llevada a cabo dentro del tanque del detector sin agua. Las corridas llevadas a cabo al sumergir el PMT en agua dentro del detector, fueron realizadas en agua municipal y agua municipal tratada con alumbre y peróxido de hidrógeno. Los máximos, mínimos, promedios y desviaciones estándar de la señal (ADCp) se encuentran presentes en el **Cuadro 23**.

Para comprender el efecto medio producido por el tiempo [bin x 25ns] y/o por el medio de medición en la Señal (ADC_p) asignada, se realizó un análisis ANOVA (**Cuadro 24**, prueba de efectos inter-sujetos) de dos vías. La prueba de efectos inter-sujetos mostró una similitud de las medias de la señal (ADC_p), asignada a la interacción del efecto del tiempo y el tipo de medición, a un nivel de sig. 2.130E-209. Además, las medias estimadas para esta interacción presentan una varianza del 48.853 (Valor-F). Al ser el valor de sig mucho menor al Valor-F se rechaza la hipótesis nula planteado para el modelo (X. Análisis de resultados). Por consiguiente, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias estimadas de la señal (ADC_p), asignada a la interacción del efecto del tiempo y el tipo de medición.

Cuadro 23. Análisis de señal obtenida de las corridas realizadas en el tanque del detector: del PMT sumergido en agua municipal, PMT en el aire dentro del tanque y el PMT sumergido en el agua municipal tratada con sulfato de aluminio tipo B y peróxido de hidrógeno.

Medición	Tiempo (Bin x 25 ns)	Señal (ADC_p)			
		Promedio ^a	Desviación ^a	Min. ^a	Max. ^a
Realizada en agua municipal	1	50.0	2.4	43.0	63.0
	2	53.4	9.9	43.0	99.0
	3	260.6	175.2	100.0	1022.0
	4	176.8	138.2	50.0	1003.0
	5	93.3	59.3	47.0	907.0
	6	68.4	23.2	48.0	387.0
	7	58.1	9.5	48.0	169.0
	8	53.8	4.5	47.0	86.0
	9	52.2	3.2	47.0	69.0
	10	51.4	2.3	48.0	62.0
	11	51.2	2.5	47.0	69.0
	12	50.7	2.1	47.0	59.0
Realizada en el aire	1	50.0	0.5	49.0	51.0
	2	55.5	13.8	48.0	119.0
	3	168.1	122.6	120.0	961.0
	4	105.5	102.7	56.0	945.0
	5	69.3	58.9	50.0	847.0
	6	58.6	30.3	49.0	578.0
	7	53.4	7.9	50.0	180.0

Continuación Cuadro 23

Medición	Tiempo (Bin x 25 ns)	Señal (ADC _p)			
		Promedio ^a	Desviación ^a	Min. ^a	Max. ^a
Realizada en el aire (continuación)	8	51.7	2.9	49.0	86.0
	9	50.9	1.7	49.0	68.0
	10	50.7	1.1	49.0	61.0
	11	50.5	1.0	49.0	61.0
	12	50.4	0.8	49.0	56.0
Realizada en agua tratada con Alumbre y H ₂ O ₂	1	50.1	0.5	49.0	51.0
	2	54.9	11.9	49.0	119.0
	3	160.5	101.2	120.0	950.0
	4	97.2	74.6	55.0	923.0
	5	64.2	20.7	53.0	357.0
	6	56.4	7.2	51.0	127.0
	7	52.9	3.4	50.0	84.0
	8	51.4	2.1	49.0	79.0
	9	50.9	1.2	49.0	62.0
	10	50.7	0.9	49.0	57.0
	11	50.5	0.7	49.0	54.0
	12	50.4	0.7	49.0	55.0

a = El tamaño de las muestras analizadas fue de N= 385.

En el caso del efecto del tiempo [bin x 25ns] (**Cuadro 24**) se obtuvo una similitud entre las medias de la señal con un nivel de sig. 0.000, con una varianza de 182.446 (Valor-F). Al ser la sig. mucho menor al Valor-F se rechaza la hipótesis nula planteada para el modelo (X. Análisis de resultados), por lo que existe diferencia estadísticamente significativa para el efecto del tiempo (bin x 25ns) sobre la señal (ADC_p). El efecto de la medición realizada sobre la señal brinda una similitud entre las medias a un nivel sig. $6.197 \cdot 10^{-79}$. La varianza de los datos respecto a las medias estimada para este efecto fue aun nivel de 182.446 (valor-F). Como consecuencia de la diferencia entre el Valor-F y la sig, se puede rechazar la hipótesis nula planteada para el modelo (X. Análisis de resultados). Por lo tanto, existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias estimadas de la señal (ADC_p) asignada a los tres diferentes medios de medición. Vista la presencia de diferencias de medias, se realizó un análisis Post-Hoc (Prueba de Tukey) para analizar la procedencia de esta diferencia en la señal [ADC_p] asignada a la medición (**Cuadro 26**) y tiempo [bin x 25ns] (**Cuadro 25**).

Cuadro 24. Prueba de efectos inter-sujetos para evaluar el efecto de toma de la Señal (ADC_p) asignada a la medición realizada, al Tiempo (bin x 25ns)

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Señal [ADC_p]

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	29294046.589 ^a	35	836972.760	299.033	.000
Interceptación	73659034.806	1	73659034.806	26316.883	.000
Tiempo	25202988.850	11	2291180.805	818.593	.000
Medición	1021308.834	2	510654.417	182.446	6.197E-79
Tiempo * Medición	3069748.904	22	139534.041	49.853	2.130E-209
Error	38692367.605	13824	2798.927		
Total	141645449.000	13860			
Total corregido	67986414.194	13859			

a. R al cuadrado = .431 (R al cuadrado ajustada = .429)

La prueba Post-Hoc para los doce diferentes bins de medición generó cinco grupos homogéneos, **Cuadro 25**, el aumento los valores de señal que comprender los subconjuntos va en diagonal de arriba para abajo. El primer subconjunto contiene los bins 1, 12, 11, 10, 9, 8, 2, 7, con medias estimadas entre 50.0338 y 54.7913 ADC_p, con una igualdad a un nivel sig. 0.578. Los últimos dos bins (2 y 7 bin) de tiempo presentes en el primer subconjunto, al ser ligeramente mayores a los de este grupo, se encuentran también en el segundo subconjunto. Este se encuentra comprendido por 2, 7 y 6 bin en medias estimadas entre 54.6346 y 61.1082 ADC_p, con una similitud a un nivel de sig. 0.127. Los tres siguientes subconjuntos fueron conjuntos unitarios, en los que el máximo de señal fue estimado para el 3 bin (quinto subconjunto). En cuanto a los resultados obtenidos, se puede ver que los bins que siguen al máximo corresponden al aumento y decrecimiento del pulso

Cuadro 25. Prueba de Post-Hoc para evaluar el efecto sobre la señal [ADC_p] asignada al tiempo [Bin x 25 ns].

Señal [ADC_p]

HSD Tukey^{a,b}

Tiempo [Bin x 25 ns]	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	5
1	1155	50.0338				
12	1155	50.5186				
11	1155	50.7316				
10	1155	50.9203				
9	1155	51.3368				
8	1155	52.2667				
2	1155	54.6346	54.6346			
7	1155	54.7913	54.7913			
6	1155		61.1082			
5	1155			75.5905		
4	1155				126.4658	
3	1155					196.4095
Sig.		.578	.127	1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 2798.927.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 1155.000.

b. Alfa = .05.

La prueba Post-Hoc realizada para los tres medios de medición generó dos subconjuntos homogéneos (**Cuadro 26**). El primer subconjunto se encuentra conformado por el PMT en el aire y sumergido en el agua tratada con Alumbre y peróxido de hidrógeno, con medias estimadas de 65.8333 y 67.8861 ADC_p y una igualdad entre ellas a un nivel de sig. 0.149. El segundo subconjunto fue unitario, con únicamente la medición realizada al sumergir el PMT en el agua municipal, la cual presentó una media estimada mayor que las demás mediciones (84.9825 ADC_p).

Cuadro 26. Prueba de Post-Hoc para evaluar el efecto sobre la señal [ADC_p] asignada a la medición realizada.

Señal [ADC_p]

HSD Tukey^{a,b}

Medición	N	Subconjunto	
		1	2
En agua tratada con Alumbre y H ₂ O ₂	4620	65.8333	
En aire	4620	67.8861	
En agua municipal	4620		84.9825
Sig.		.149	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

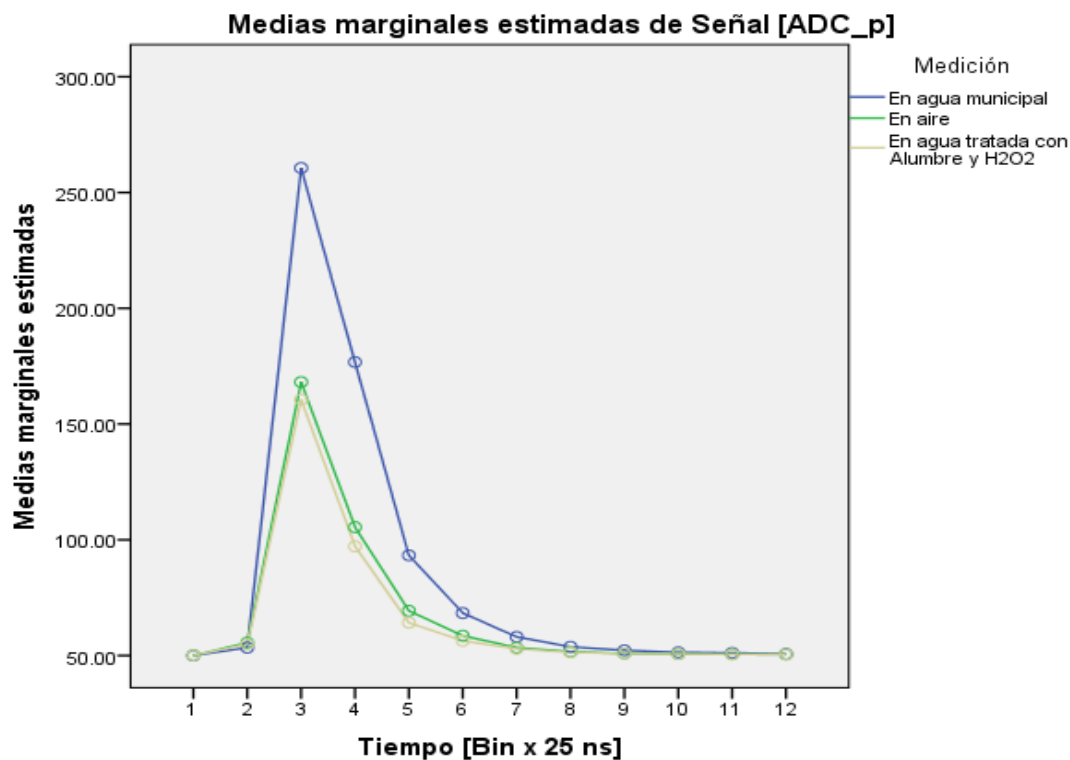
El término de error es la media cuadrática(Error) = 2798.927.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4620.000.

b. Alfa = .05.

En la **Figura 82** es observable lo discutido anteriormente, respecto a los **Cuadro 26** y **Cuadro 25**. Gráficamente, se puede ver que las medias estimadas respecto a las mediciones presentan diferencia en la intensidad de la señal en el máximo del pulso, en la que es notorio, el efecto significativo del tercer bin. Este bin es equivalente a 75 ns, en el que se encuentra la máxima intensidad para todas las mediciones. Por lo que se puede inferir que este es el tiempo en que la radiación Vavilov-Cherenkov, emitida por el paso de una partícula relativista, se toma en ser completamente reflejada en el Tyvek y perder su correlación direccional, respecto al cono de emisión y el movimiento de la partícula. En consecuencia, genera una nube de fotones que maximizan la probabilidad de detección de por el PMT (Asorey, 2012). Los bins seguidos muestran que en 200 ns (del 4 - 12 bin, **Figura 82**) la radiación generada continúa siendo reflejada y progresivamente absorbida por el agua o el Tyvek, hasta su extinción (Asorey, 2012).

Figura 82. Medias marginales estimadas de la Señal (ADC_p) asignadas a Tiempo (bin x 25ns) y la medición realizada.



La diferencia en las intensidades de los 3, 4 ,5 ,6 ,7 bins (**Figura 82**), para los diferentes medios, permite tomar en cuenta más consideraciones. Según, Etchegoyen, *et al* (1996) el número de fotoelectrones detectados por el PMT aumenta significativa al realizar filtraciones al agua municipal o al trabajarse con agua desionizada o inclusive llegaba a triplicarse al filtrar el agua desionizada. Con base en esto, se puede inferir que la presencia de flóculos o sólidos disueltos en el agua, al ser agentes absorbentes, causen atenuación en la distribución de radiación electromagnética. La absorbancia del agua municipal (**Figura 79**) en la región 379.940 y 500.320 nm (UV y azul del espectro visible) fue menor, en comparación al agua tratada con alumbre y peróxido de hidrógeno. Ambas presentaron su mínima absorbancia en 429.509nm, cercana a la longitud de onda de máxima respuesta del PMT, 420 nm (Hamamatsu Photonics, 2013). Como se mencionó en la sección de Absorbancia (p. 217), el mínimo de las absorbancias permitía definir que el máximo de radiación electromagnética, a esta longitud de onda, transmitida era del 89% ($Abs \sim 0.05$) para el agua municipal. Mientras que, para el agua tratada con

sulfato de aluminio y peróxido de hidrógeno el mínimo definió que la transmitancia máxima del agua era del 81% (Abs ~ 0.09). Estos resultados son congruentes con lo obtenido en la **Figura 82**, ya que el agua municipal absorbió menos de la radiación Vavilov-Cherenkov generada y por lo tanto permitió una mayor amplitud de los pulsos detectados.

Otros parámetros útiles para comprender la diferencia de los pulsos son la turbidez, la conductividad, el índice de refracción y el coeficiente de reflexión. El agua municipal tubo una turbidez del 0.36 ± 0.01 NTU y para el agua tratada se obtuvo un valor de 2.67 ± 0.01 NTU (**Figura 78**). En la **Figura 82** se puede ver que el medio con mayor turbidez, agua tratada, presentó una mayor atenuación en la intensidad de los pulsos detectados. En consecuencia, se puede inferir que el agua tratada generó una mayor dispersión de la luz por la presencia de los flóculos formados por el hidróxido de aluminio (adsorbe iones disueltos en el agua). Por lo que se puede considerar que este parámetro permita definir el efecto real de los sólidos presentes en el agua, y por lo tanto su efecto en la detección de los pulsos detectados por el PMT.

La conductividad (**Figura 77**) fue de 160.42 ± 1 μ S/cm para el agua municipal y de 202.92 ± 1 μ S/cm para el agua tratada, esto es equivalente a 80.21 ppm y 101.46 ppm TDS (Ecuación 8), respectivamente. En la **Figura 82**, se puede ver que el medio con menor conductividad (agua municipal) generó una mayor detección de la intensidad de los pulsos por el PMT. Con base en esto se puede inferir que al tener una menor conductividad, el agua municipal, la radiación electromagnética emitida penetra mejor el medio (Muñoz y *et al*, 2012) que en el agua tratada. Además, por tener un menor valor de TDS (el agua municipal) podría inferirse que los iones y electrolitos presenten no afectan tan significativamente (por medio de polarización iónica), en comparación del agua tratada, la polarización eléctrica del medio por el paso de las partículas cargadas en el detector.

El índice de refracción (**Cuadro 20**) para el agua tratada ($n^D = 1.3325$) brinda un menor valor que el agua municipal ($n^D = 1.3330$). En el caso del agua tratada ocurrió el mismo patrón que con el agua con peróxido de hidrógeno ($n^D = 1.3325$) y en el caso del agua municipal se obtuvo el mismo valor que el agua ultra-pura ($n^D = 1.3330$). Este último corresponde completamente al valor teórico, del agua, a esta longitud de onda de

1.333 ($\lambda=590\text{nm}$) (Segelstein, 1981). El menor valor de n para el agua tratada, permite inferir que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas ($v = c / n$) tiende a ser levemente más cercana a la del vacío (c) en el medio, por lo que sería considerable una mejor transmisión y obtención de la radiación Vavilov-Cherenkov por el paso de las partículas relativistas. A pesar de esto, como se puede ver en la **Figura 82** el agua tratada no generó una mejor detección de la radiación Vavilo-Cherenkov, sino en cambio una atenuación. Es considerable que el peróxido de hidrógeno cause un efecto directo sobre el índice de refracción, por su dependencia de la constante dieléctrica, pero a diferencia de lo obtenido se esperaría un aumento sobre esta variable. El aumento esperado es explicado por las correlaciones mostradas en las Ecuaciones 12 y 14, en el que al aumentar la constante dieléctrica del medio aumenta el índice de refracción. La constante dieléctrica en el medio es considerable que haya aumentado, porque el peróxido de hidrógeno en un medio acuoso con agua, aumenta la asociación de puentes de hidrógeno (Cotton y Wilkinson, 1972). Por ejemplo, en una solución al 65% de agua con peróxido de hidrógeno tienen una constante dieléctrica de 120, mientras que una solución pura de H_2O_2 tiene una constante dieléctrica de 93 (Cotton y Wilkinson, 1972). A pesar de esto, como en el tanque del detector (agua tratada) no solo se tenía agua y peróxido de hidrógeno, es considerable que la presencia de iones disueltos en el agua (provenientes del agua municipal), la presencia de flóculos formados por el hidróxido de aluminio y los sulfatos de calcio formados causen diferentes efectos en la propagación de las ondas electromagnéticas. Además, otro factor que pudo influenciar los resultados es el hecho de trabajarse en un medio dispersivo (i.e n dependiente de λ), al ser una longitud de onda de la región amarilla ($\lambda = 586.3 \text{ nm}$) del espectro visible, no permita predecir de forma concreta el efecto de esta variable sobre el número de fotones emitidos en el cono externo de la radiación Vavilov-Cherenkov. Con base en esto se recomienda realizar un estudio a mayor profundidad del efecto del peróxido de hidrógeno sobre el índice de refracción del medio, a diferentes longitudes de onda.

En el caso de la reflectividad del Tyvek, en las mediciones realizadas en las jarras (**Cuadro 19**) se obtuvo que al sumergirlo en agua municipal la reflectividad del material, tomando en cuenta la atenuación causada por el medio, fue de 25.34%; bastante similar a

la obtenida para el agua ultra pura (24.08%, Cuadro 22). Mientras que al sumergirlo en el agua utilizada en el tanque del detector (Cuadro 22) el coeficiente de reflexión fue del 28.59%, cercano al obtenido para la jarra 2 con ácido tricloroisocianúrico (30.56%,

Cuadro 19). En los que el factor que primordialmente definió una diferencia entre los medios fue la conductividad, ya que los dos medios mencionados con un menor valor (agua municipal y agua ultra pura) dieron como resultado un valor similar en el porcentaje de reflexión, al igual que los dos con mayor conductividad (agua con ácido tricloroisocianúrico y agua tratada). Por lo que se podría inferir que el agua tratada permitiría una mejor reflectividad del Tyvek y que la conductividad promoviera este comportamiento, y por lo tanto llegasen más fotones de la radiación Vavilov-Cherenkov al PMT. A pesar de esto, en la Figura 82 se puede ver que el agua tratada tuvo una menor intensidad media de los pulsos detectados, en comparación al agua municipal. Se puede inferir que, al ser un medio conductor, la radiación electromagnética haya sido conducida rápidamente afuera del medio (como en el caso de los metales; Griffiths, 1999) permitiendo la obtención de una mayor reflexión de la luz por el Tyvek, pero por la presencia de los iones y flóculos, estos absorban la radiación y causen una atenuación. Este último concepto es solo una suposición del posible efecto del resultado, pero no se puede concluir si realmente fue la causa; por lo que se recomienda realizar un estudio a mayor detalle sobre la reflectividad y la conductividad en el medio. Además, otro factor que pudo influenciar estos resultados fue la longitud de onda de medición de 650nm que, al ser de la región roja del espectro visible y comprender la parte interna del cono de emisión de fotones de la radiación Vavilov-Cherenkov (Cherenkov, 1958), los resultados no definan la verdadera reflexión de los fotones del cono externo (UV-azul del espectro visible) detectados por el PMT.

Con base en la prueba Post-Hoc, **Cuadro 26**, y las medias estimadas observables en la **Figura 82**, existe igualdad estadísticamente significativa entre los pulsos detectados en el agua tratada y las mediciones realizadas con el PMT en el aire. Las posibles explicaciones de la atenuación de la intensidad fueron descritas anteriormente para el agua tratada, pero en el caso de las mediciones realizadas con el PMT en el aire pueden ser causadas por otros elementos. Según N. Chavez, M. Medina y L. Villaseñor (2000), el

vidrio del PMT actúa como un centellador y al interactuar con los rayos cósmicos produce radiación Vavilov-Cherenkov, la cual aumenta con el área superficial de la ventana de entrada. Al realizarse las mediciones (**Figura 82**), se obtuvo que efectivamente la generación de la Radiación Vavilov-Cherenkov era generada sin la necesidad de estar sumergido en el agua.

Los pulsos obtenidos pudieron ser provenientes de la interacción de la radiación cósmica con el vidrio de borosilicato del PMT, ya que todos los materiales transparentes son candidatos para ser radiadores Vavilov-Cherenkov (**Figura 10**, Grupen y Shwartz, 2008). Este al tener un índice de refracción de 1.47 brinda un límite mínimo¹⁸ de $\beta \left(= \frac{v}{c} \right)$ de 0.68, el cual se asemeja al límite del agua con un valor de 0.75 ($n = 1.3325$) aproximadamente. Por lo que es considerable que ambos, permitan la detección del mismo umbral de partículas relativistas y por explicaría la ligera similitud de los pulsos con el agua tratada. A pesar de esto, es considerable que el agua tratada genere atenuación sobre la intensidad de los pulsos por la presencia de los floculos e iones, en comparación con el agua municipal. Mientras que en el vidrio de borosilicato la presencia de contaminantes es casi nula, ya que para su fabricación se realizan procesos de purificación en los que se buscan disminuir posibles trazas de ⁴⁰K y de otros agentes (Hamamatsu Photonics, 2013), por lo que no es considerable que esto cause la poca amplitud del pulso en comparación al agua municipal. La posible explicación es que la ventana de entrada de PMT no es muy gruesa, en consecuencia, la partícula que atraviesa el material tiene menor distancia de recorrido y por lo tanto emite menos fotones (por la dependencia de la emisión de fotones respecto a la trayectoria) que al atravesar el tanque lleno de agua. Con base en lo descrito anteriormente, se puede inferir que la atenuación de la intensidad de radiación Vavilov-Cherenkov por la presencia de agentes absorbentes en el agua, es estadísticamente similar a la disminución de emisión de fotones al tenerse un medio con espacio limitado para la trayectoria de la partícula.

¹⁸ Valor mínimo permitido para la generación de radiación Vavilov-Cherenkov: $\beta = \frac{v}{c} = 1/n$ (Cherenkov, 1958)

XII. MÓDULO DE EXPERIMENTOS EN SIMULACIÓN

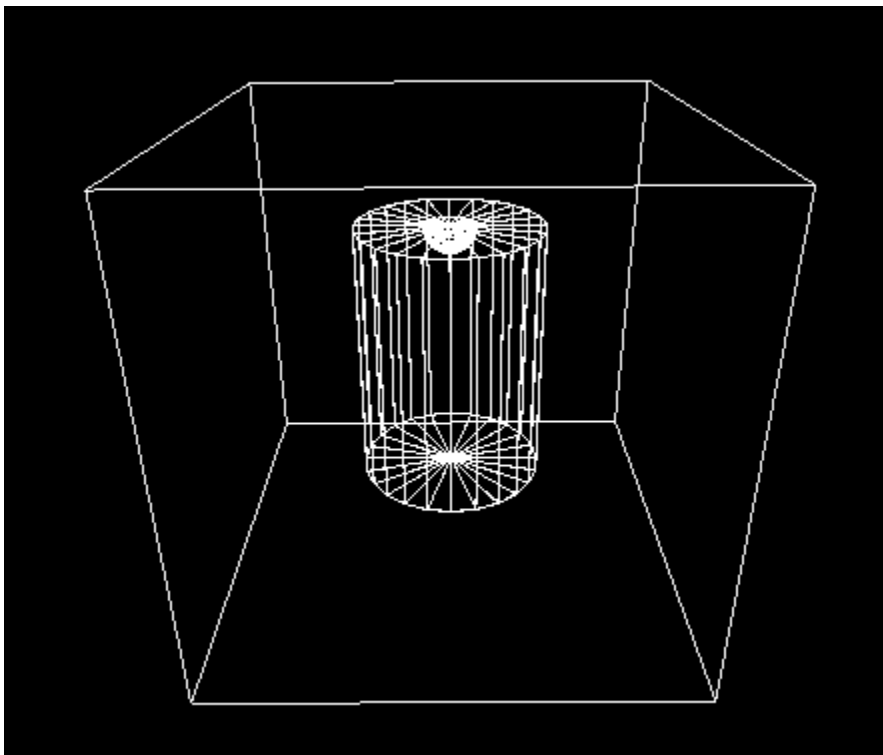
A. Metodología

1. Desarrollo de la simulación. El objetivo del experimento fue caracterizar las señales de partículas que inciden en el tanque. Para la simulación, se decidió analizar los pulsos de muones de alrededor de 4 GeV de energía, rayos gamma de 100 MeV de energía y electrones de 37 MeV de energía. Los primeros son muones provenientes de la cascada muónica, que por su alta energía no decaen dentro del tanque. Los rayos gamma son partículas que se obtendrían con mayor frecuencia en el tanque a mayores altitudes, por lo que servirá para futuros proyectos. Los electrones de 37 MeV son electrones con la energía promedio de la distribución de Michael, producidos por el decaimiento de muones dentro del tanque. Estos electrones depositan toda su energía dentro del tanque y según (Allison *et al*, 2005) sirven para calibrar el instrumento debido a que su energía ocurre en el primer pico en los histogramas de carga del experimento.

Para la simulación se utilizó el programa Geant4, desarrollado por CERN para simulación de experimentos de partículas. El paquete de descarga incluye ejemplos básicos y avanzados de experimentos que se utilizaron de referencia para el desarrollo del presente. En particular, mucho del código se basó en los ejemplos OpNovice (que implementa la radiación Cherenkov) y HitLXE (que utiliza fotomultiplicadores). El desarrollo del programa fue auxiliado por el trabajo de Héctor Pérez durante todo el proceso; ambos programas están disponibles en el repositorio <https://github.com/hepfpeh/Geant4-WCD.git>.

a. **Geometría.** Los objetos de la construcción del detector relevantes para la simulación son los objetos con los que interactúan los fotones ópticos y los secundarios incidentes dentro del tanque. Estos objetos son el recubrimiento de Tyvek, que se toma como una capa cilíndrica, el agua dentro del Tyvek, la superficie de vidrio borosilicato del fotomultiplicador y el fotocátodo de aluminio, ambos tomados como semiesferas. Geant4 permite organizar objetos según jerarquías: el **Cuadro 59** en el capítulo de Anexos describe la forma, dimensiones y colocación de los objetos y sus jerarquías bajo los respectivos volúmenes madre. Las dimensiones del Tyvek y de las semiesferas que conforman la parte del fotomultiplicador en contacto con el agua fueron medidas directamente del tanque del experimento.

Figura 83. Ilustración de la geometría general del detector en la simulación Geant4, mostrando el recubrimiento Tyvek en forma cilíndrica y las superficies de vidrio y fotocátodo del fotomultiplicador



(Fuente propia)

b. Materiales. Los materiales se tomaron del catálogo de NIST de Geant4, y con la clase `G4MaterialsPropertiesTable` se asignaron valores de índices de refracción y largo de atenuación al agua correspondientes a una lista de energía de fotón (para las tablas completas, ver el **Cuadro 60** en Anexos) y el índice de refracción del borosilicato se tomó como 1.50. El vacío se modeló como gas hidrógeno a una temperatura de 0.1 kelvin y con la densidad promedio del universo.

c. Superficies. Se especificaron dos superficies: la superficie entre el agua y el recubrimiento de Tyvek, y el borde del fotocátodo. Ambos bordes se crearon con la clase `G4OpticalSurface`, y son:

- Agua-Tyvek: El tyvek se colocó como volumen madre del agua para que ambos estuvieran completamente en contacto en el borde del volumen del agua (a excepción del contacto del agua con el vidrio de borosilicato). Esta superficie es de tipo dieléctrico-metal (reflexión o absorción), terminado *ground* por la aspereza del Tyvek, y se le asignó el modelo *unified* de Geant4. Los detalles de las propiedades que se especificaron para esta superficie se asignaron usando una tabla de propiedades de material (*G4MaterialPropertiesTable*), que se resumen en el **Cuadro 27**.
- Fotocátodo: El fotocátodo es el volumen de detección de la simulación, por lo que en su superficie se especificó una eficiencia de 1 (la eficiencia cuántica se tomó en cuenta luego en forma de la respuesta espectral para la generación de pulsos). Se creó de tipo dieléctrico-metal (reflexión o absorción), con terminado *polished* y se le asignó el modelo *glisur* de Geant4 (sin embargo, debido a que se tomó como superficie lisa, los efectos de superficie no son relevantes y el modelo no es usado).

Cuadro 27. Descripción de las propiedades de la superficie Agua-Tyvek asignadas para dos energías de fotón

Energía del fotón	Reflectividad	Eficiencia	Coefficiente de refracción	Constante especular	Constante de retrodispersión
2.034	0.2534	0	1.333	0.3	0.2
4.136	0.2534	0	1.333	0.3	0.2

Los valores de reflectividad del Tyvek y el índice de refracción del agua fueron obtenidos en el módulo de "Medio de distribución de detector de radiación Vavilov-Cherenkov" del presente Megaproyecto mediante un experimento de reflectividad del Tyvek sumergido en jarras con agua y con la refracción en agua de la luz de una lámpara de sodio.

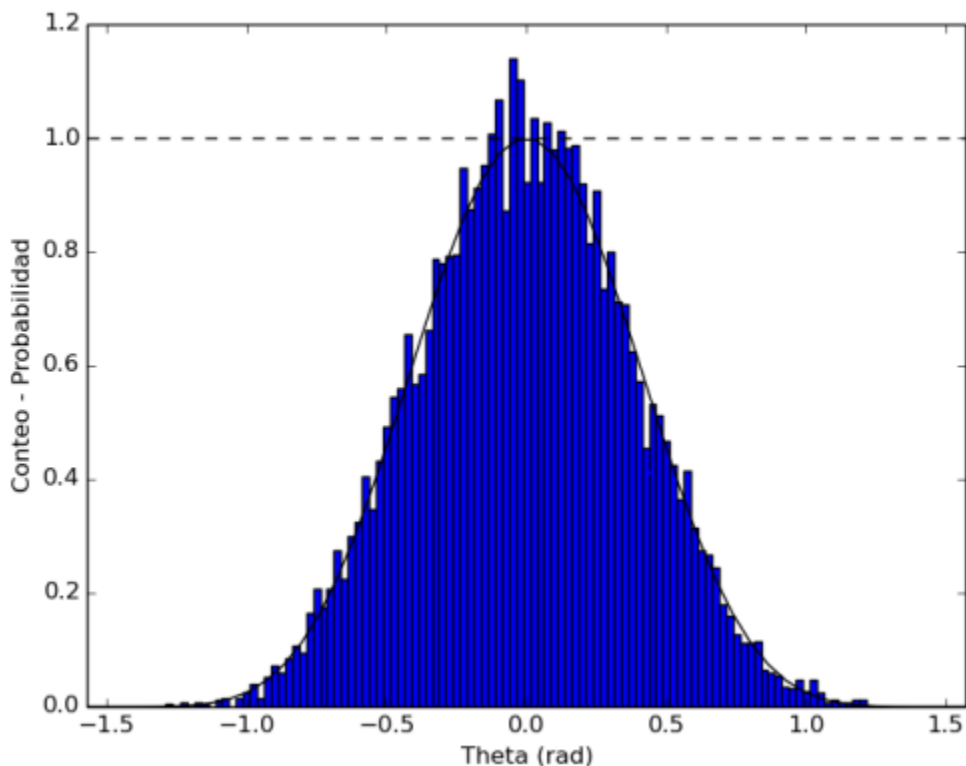
d. Detección. Se definió al fotocátodo como detector asignándolo como el SensitiveDetector. Con la clase ProcessHits se registró cada vez que un fotón entra en contacto con el fotocátodo y se guardó el tiempo de detección de cada fotón y el conteo total.

e. Generación de eventos. Se utilizó el modelo de fotones ópticos. Los procesos físicos y las clases respectivas se incluyeron en el archivo "KinichAhuPhysicsList".

La simulación consistió en tres partes. En la primera se obtuvieron los pulsos característicos de cada tipo de partícula incidente, en la segunda y tercera se obtuvieron la cantidad de fotones detectados; esta última es proporcional a la medida de carga integrada (ADCq) del WCD. Para la primera se definieron la posición y dirección de las partículas incidentes como constantes de tal manera que atravesaran el tanque completo verticalmente.

En la segunda y tercera parte del experimento se utilizó una distribución uniforme sobre la tapa superior del tanque para definir la posición, una distribución uniforme para el ángulo azimutal (medido paralelo a la horizontal), una distribución dada por $\cos^2\theta$ para el ángulo polar (medido respecto a la vertical) y una distribución uniforme en energía desde 0.5 GeV a 4 GeV (que corresponde a muones que cruzan). Para definir θ , se utilizó muestreo por rechazo para obtener valores de theta según la distribución.

Figura 84. Distribución para el ángulo θ generadas por el algoritmo del muestreo por rechazo (histograma) y la curva $\cos^2\theta$



f. **Datos de salida.** Los tres tipos de salida principales fueron el número total de fotones producidos por evento, el número total de fotones detectados por evento, y el tiempo de cada detección. La cantidad de fotones producida se obtuvo con el archivo "KinichAhuStackingAction" verificando la producción de fotones ópticos secundarios en cada paso del track. El número total de fotones detectados y su tiempo de detección se obtuvo imprimiendo el valor de `GetGlobalTime()` del track cada vez que un fotón óptico entra en contacto con el fotocatodo y agregando un contador. Todos estos datos se imprimían por event; usando el modo batch de Geant4 desde la terminal, se guardaron directamente a un archivo ".txt".

Los primeros dos tipos de datos de salida se utilizaron para investigar cómo son sus distribuciones para eventos repetidos y para determinar si la energía de muones verticales incidentes está correlacionada con la cantidad de fotones detectados. Se presupone que la señal obtenida del fototubo para muones verticales que atraviesan depende principalmente de la longitud del tanque.

El número de fotones detectados por evento también se utilizó para generar los histogramas de fotones detectados y la relación con la pureza del agua. En este experimento se alteraron todos los valores de absorción del agua en la tabla de propiedades del agua por valores entre 0 y 1: valores menores de absorción corresponde a menor pureza. Se corrió el experimento con la distribución descrita para muones entre 0.5 y 4 GeV y se ubicaron los máximos en el histograma de fotones detectados.

El tercer tipo de salida se utilizó para la caracterización de los pulsos generados por a) muones verticales que atraviesan (4GeV), b) partícula gamma de 100 MeV (detectable a grandes altitudes) y c) electrones de Michael producidos por el decaimiento de muones en el tanque (37 MeV). Cada fotón excita una cantidad de electrones en el fotocátodo, produciendo corriente en el fotomultiplicador. Esta corriente está dada por la respuesta espectral del PMT, que para la longitud de onda de interés es de 80 mA/W para una longitud de onda de 405 nm. Cada detección carga al multiplicador y la corriente producida decae como en un circuito RC.

$$I(t) = I_0 e^{t/\tau}$$

Donde Tau se determinó experimentalmente alimentando el osciloscopio directamente del fotomultiplicador, arrojando un valor 18.76 ± 0.03 . Se desarrolló un programa para generar pulsos del PMT a partir de los tiempos de detección (el programa está completo en repositorio del proyecto). Se calcularon los intervalos de confianza (95%) del valor de amplitud para cada tiempo de todos los pulsos respectivos para cada tipo de partícula y así obtener los pulsos característicos. También se realizaron gráficas de amplitud (valor máximo del pulso) versus tiempo de subida (tiempo en nanosegundos en que toma la señal desde 0% a 100%) para cada tipo de evento, para investigar diferencias visibles en las gráficas de cada uno y compararlo con lo encontrado en (Salazar y Villaseñor, 2005)

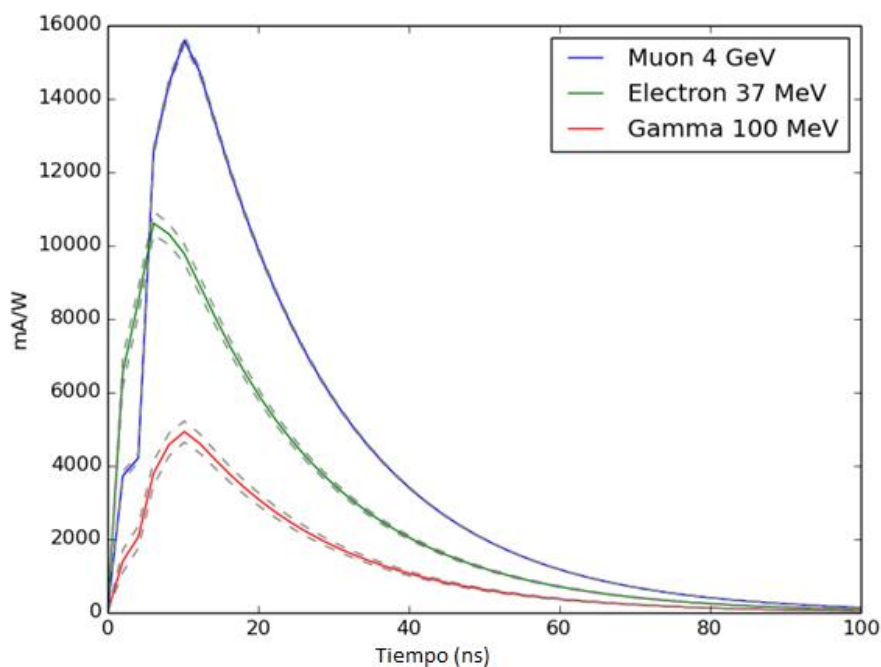
2. Calibración por histograma de datos de K'inich Ahau. El VEM se determinó a partir de los histogramas de carga integrada obtenidos de los programas "cal.cc" de ACQUA aplicados a datos crudos obtenidos de "raw.cc" de ACQUA. El valor de VEM es el de la de carga integrada (medida en ADCq) que corresponde al segundo máximo del

histograma generado por los datos de carga integrada en los archivos de salida de cal.cc. Este máximo, a su vez, corresponde a la energía de un muón vertical.

B. Resultados y discusión

1. Pulsos característicos de partículas incidentes por simulación. Se calcularon los pulsos para 1000 eventos de muones, 500 eventos de partículas gamma de 100MeV y 500 eventos de electrones de 37MeV. Las gráficas de los 2000 pulsos se pueden encontrar en la sección 361 de anexos. El valor p de la prueba Shapiro de la distribución de la amplitud en cada tiempo hizo descartar que las distribuciones fueran normales. Sin embargo, el cálculo del intervalo de confianza es robusto ante el supuesto de normalidad. La forma característica del pulso de cada tipo de partícula dada por el promedio de cada amplitud se ilustra en la **Figura 85**.

Figura 85. El promedio de todos los pulsos para cada tipo de partícula



El área bajo estas curvas representa una medida proporcional a la carga integrada que se obtiene del experimento con el WCD. Por lo tanto, tomando al pulso característico del muón de 4GeV (que atraviesa el tanque), se obtiene una definición análoga de VEM_s en

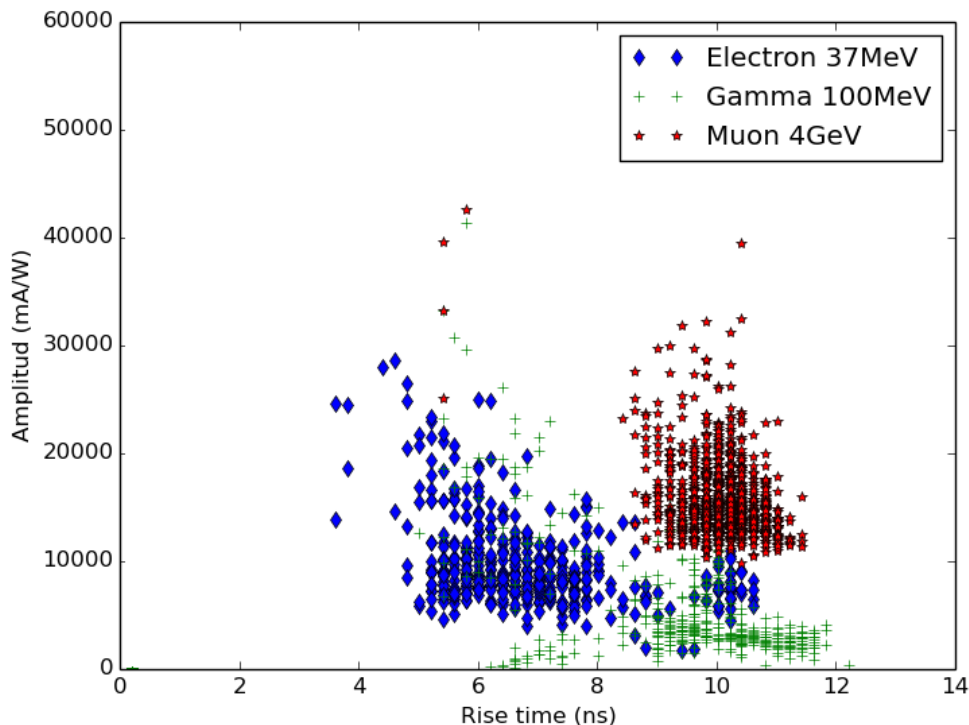
términos de la respuesta inmediata del fotocátodo (en mA). La utilidad de esto es que se pueden expresar las cargas integradas del electrón de 37 MeV y de partículas gamma en términos de esta definición de VEM_s. Calculando el área del pulso del muón con el método de trapecio, se define entonces $VEM_s \equiv 123813 \text{ mA}\cdot\text{s}$. Las áreas del electrón de Michael y de la partícula gamma de 100MeV serían 0.680542 VEM_s y 0.317576 VEM_s. Estos valores pueden ubicarse en los histogramas de carga obtenidos de una corrida de K'inich Ahau luego de haber definido el VEM del tanque.

El **Cuadro 28** y la **Figura 86**. Representación gráfica de la relación entre amplitud y tiempo de subida para los diferentes tipos de partículas que generaron los pulsos en la simulación exponen los resultados de analizar la amplitud máxima (valor discreto más grande en los datos) y tiempo de subida (tiempo en que la señal toma desde 0% hasta su amplitud máxima) para los pulsos generados de cada partícula en la simulación. Estos resultados de la simulación se comparan con los obtenidos del experimento en el módulo de caracterización, calibración y análisis de datos.

Cuadro 28: Intervalos de confianza para los valores medios de amplitud y tiempo de subida para cada tipo de partícula incidente

Tipo de partícula	Amplitud (A/W)	Tiempo de subida (ns)
Muón vertical 4 GeV	(15.5, 15.9)	(10.15, 10.19)
Electrón de Michael 37MeV	(10.5,11.9)	(6.63, 6.94)
Partícula Gamma 100 MeV	(4.5, 6.0)	(8.66, 9.19)

Figura 86. Representación gráfica de la relación entre amplitud y tiempo de subida para los diferentes tipos de partículas que generaron los pulsos en la simulación



Dado que los intervalos de confianza de amplitudes entre los tres tipos de partículas no coinciden, se acepta la hipótesis alterna de que las amplitudes de los pulsos son diferentes. Esto es bastante claro a partir de la **Figura 85**, pero vale la pena resaltarlo. De manera análoga, se acepta la hipótesis alterna de que los tiempos de subida son diferentes para cada pulso.

La **Figura 86** se realizó para evidenciar que las relaciones entre amplitud y tiempo de subida para cada pulso son diferentes entre sí. Los puntos rojos se ubican en una región diferente en el plano que los puntos azules. Esta distinción se puede comparar con el experimento con el tanque, ya que el modo de calibración de histograma permitió la clasificación de tipos de eventos de manera independiente. Por otro lado, la gráfica en la **Figura 86** muestra cierta correspondencia con la referida en la **Figura 28** de (Salazar y Villaseñor, 2005)⁵⁶. La diferencia más importante es la escala de tiempo de subida: mientras que los electrones en la simulación tuvieron tiempos de subida centrados

alrededor de (6.63, 6.94) ns, los de Salazar y Villaseñor lo están alrededor de los 10ns, y la diferencia es aún mayor para los muones. Sin embargo, esto podría explicarse por la diferencia en las dimensiones del tanque: el utilizado en (Salazar y Villaseñor, 2005) tenía un diámetro de 1.54 m mientras que K'inich Ahau tiene un diámetro de 0.42 m, ambos con el mismo alto.

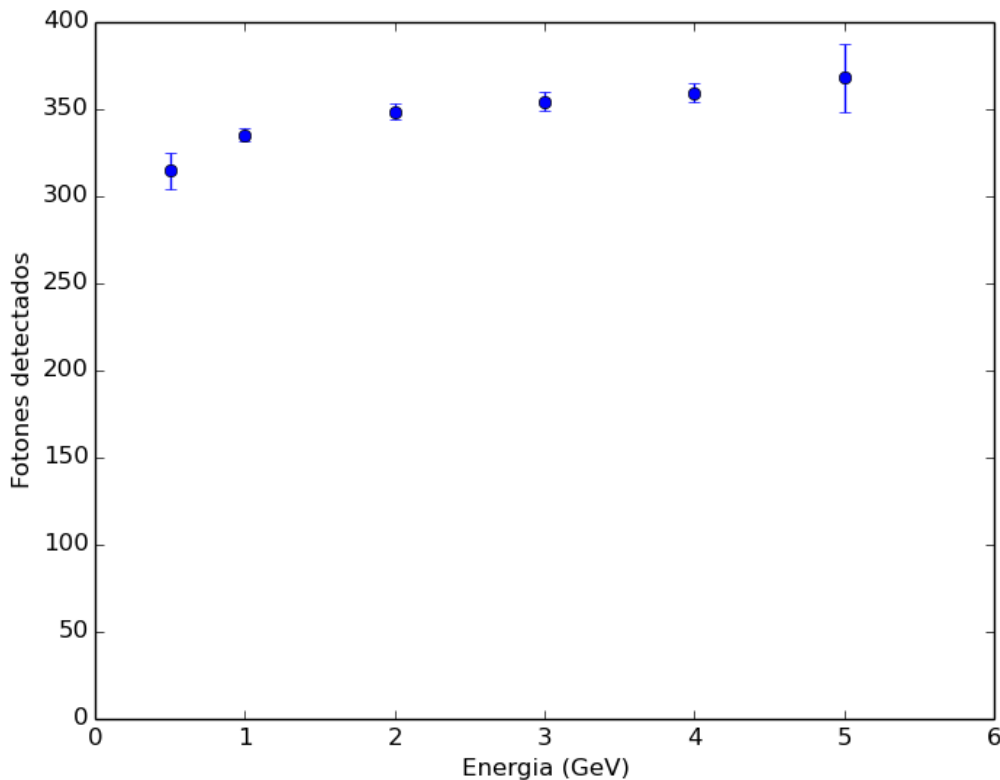
2. Fotones producidos y detectados con un muón que atraviesa en la simulación. La cantidad de fotones producidos por muones que entran al tanque es proporcional principalmente a la distancia que recorre en el tanque cuando los muones no decaen. En esta sección se investiga también la dependencia de los fotones producidos y detectados sobre la energía de los muones incidentes para eventos en la simulación.

Primero se investigó la normalidad de los fotones producidos, detectados y el cociente de estos valores para el evento de un muón vertical de 4GeV. Los detalles de este análisis se encuentran en la tercera sección de anexos. Se compararon las cantidades de fotones detectados para diferentes energías de muones verticales. Esto para poner a prueba las hipótesis:

- H_{4o} : No hay relación entre la energía de un muon vertical que atraviesa y el número de fotones detectados.
- H_{4a} : Hay relación entre la energía de un muon vertical que atraviesa y el número de fotones detectados

El análisis de la normalidad de las distribuciones revela que la distribución de los fotones detectados para una energía no sigue una distribución normal, sin embargo, el análisis ANOVA para la diferencia de dos medias es robusto ante la suposición de normalidad, en especial porque el tamaño muestral es grande ($n=1000$ o 500). Por lo tanto, se prosiguió a calcular la media de fotones detectados para diferentes energías. Su representación gráfica se muestra en la **Figura 87**.

Figura 87. Promedio del número de fotones detectados respecto a la energía del muón vertical incidente. Las barras de error representan el intervalo de un 95% de confianza.



Cuadro 29: Resultados de la regresión lineal de los valores del promedio de fotones detectados respecto a energía de muón vertical incidente

Pendiente	10.3 GeV ⁻¹
Intercepto	320
Coefficiente de correlación (r²)	0.876
Valor p	0.006006693

Debido a que el valor p de la regresión lineal es menor a 0.05, se acepta la hipótesis alterna con un 95% de confianza. Es decir, el número de fotones, y por lo tanto, carga integrada, depende de la energía del muón incidente que atraviesa el tanque incluso si este atraviesa por completo el tanque. Sin embargo, esta dependencia parece ser

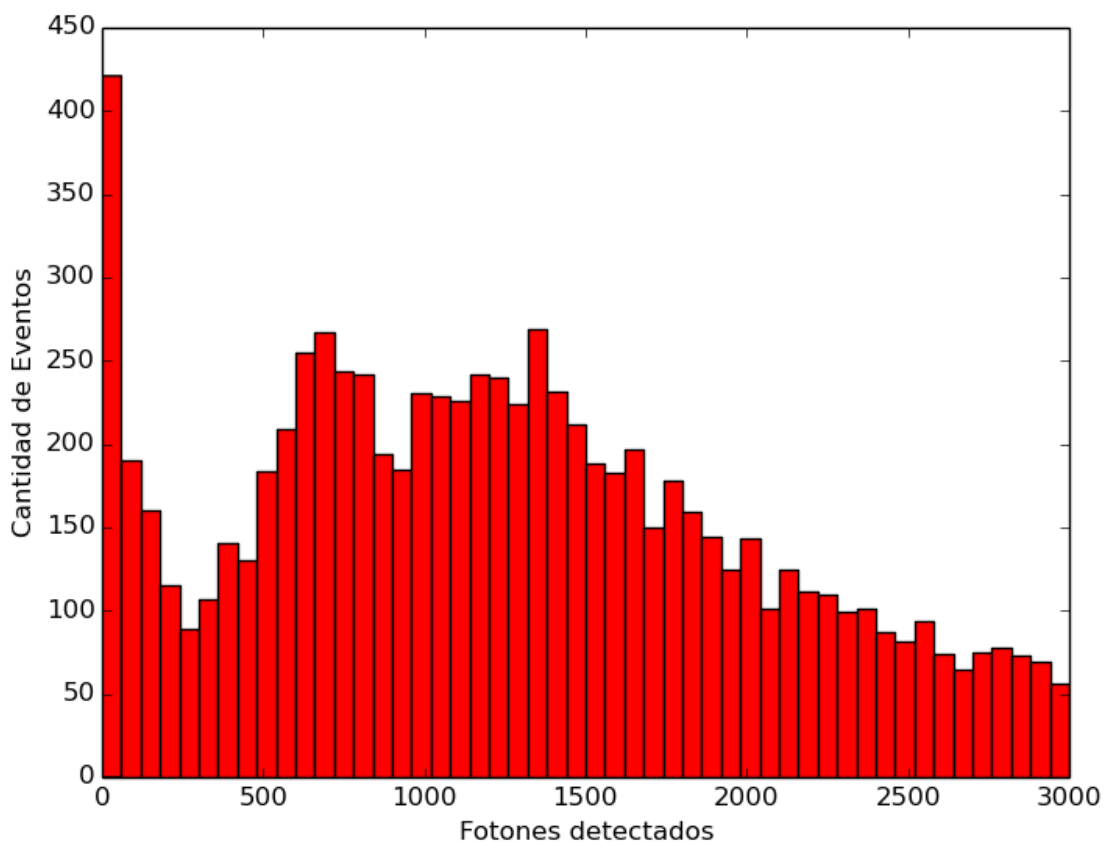
suficientemente pequeña (10.3 fotones adicionales por GeV extra del muón), lo que es consistente con las observaciones en (Asorey, 2012) de que el poder de frenado para muones es pequeño. Aun así, este resultado evidencia que el valor del VEM no solo depende de la geometría del detector sino que también está relacionado con el espectro de energía de muones incidentes. Esto sugiere que la carga integrada obtenida para un evento (que es proporcional a los fotones detectados) también puede usarse para determinar la energía de los muones que cruzan.

3. Distribución de fotones detectados para muones entre 0.5 y 4 GeV. Al disparar 10,000 muones con las distribuciones de posición, dirección y energéticas descritas en la sección de metodología, se obtuvo el siguiente histograma para los fotones detectados mostrado en la **Figura 88**.

Ya que los fotones detectados son proporcionales a la medida de carga total integrada ADCq que se obtiene en las mediciones del detector, este histograma muestra la componente de muones que cruzan de los histogramas de carga del modo histograma. La propiedad más importante de este histograma es que expone el máximo para muones que atraviesan verticalmente.

La equivalencia entre esta posición y la obtenida de los histogramas de carga ADCq sugiere una relación entre fotones detectados y carga integrada ADCq para muones que atraviesan. Sin embargo, este valor debería de obtenerse a través de un experimento con láser en el fototubo; este análisis es tan solo complementario ya que en la simulación no se tomó en cuenta los funcionamientos del fototubo ni del proceso de digitalización.

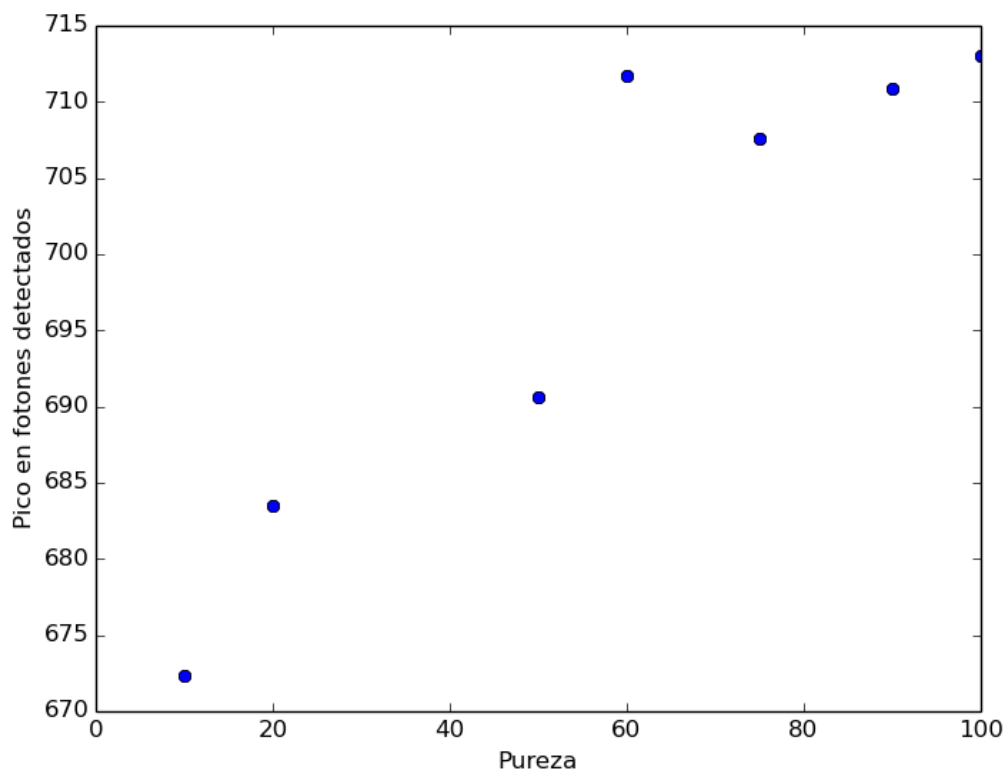
Figura 88. Histograma de fotones detectados para el arribo de muones entre 0.5 y 4 GeV



Se investigó además la dependencia de la posición del máximo en histogramas de fotones detectados con la longitud de atenuación del agua. El resultado se expone en la gráfica de la figura **Figura 89**.

Ya que el valor p de la regresión lineal es mucho menor a 0.05, se puede decir que existe una correlación estadísticamente significativa entre la longitud de atenuación y el máximo de fotones detectados para muones que cruzan. La pendiente es de 0.44579 fotones detectados por porcentaje de largo de atenuación; ya que el largo de atenuación es una medida de la pureza del agua y cambia en medidas apreciables, se refuerza la importancia de encontrar el valor VEM de los tanques y controlar la progresiva contaminación del agua.

Figura 89. Posición de los máximos de los histogramas de fotones detectados en la simulación para diferentes porcentajes de pureza



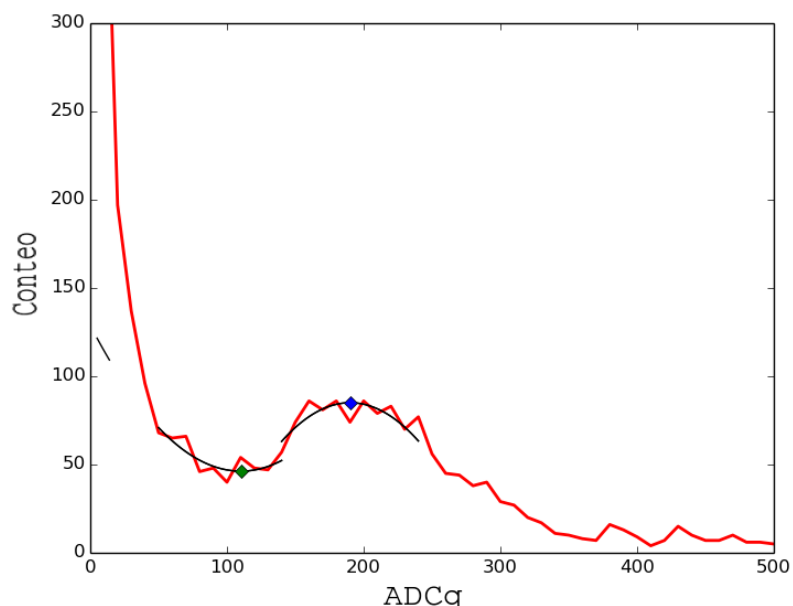
Los resultados de una regresión lineal aplicada a la gráfica son

Pendiente	0.44579
Intercepto	672.74
Coefficiente de correlación (r^2)	0.928127
Valor p	0.00255820

4. Calibración de K'inich Ahau. Se capturaron datos durante 4 horas con el tanque K'inich Ahau. Primero se utilizó la extensión -c del archivo "raw.cc" para obtener las cargas integradas de todos los pulsos. Luego, se graficaron estas cargas integradas en forma de histograma. La posición del segundo máximo corresponde a la carga integrada generada por un muón vertical, ya que la dirección de los muones que inciden provenientes de cascadas de área extensa sigan una distribución dada por $\cos^2(\theta)$, donde θ es el ángulo medido respecto a la vertical y cuyo valor esperado es justo en $\theta=0$. Se

realizó una regresión cuadrática en el intervalo [140,240] ADCq (escogido visualmente) y se determinó el valor del VEM de 190 ± 20 . De la misma manera, se obtuvo el punto de transición (el valor mínimo antes del VEM) de 101 ± 20 .

Figura 90. Histogramas ADCq de 4 horas de funcionamiento del detector, con el segundo pico identificado con una regresión cuadrática entre 140 ADCq y 240 ADCq y el punto de transición con el mismo método entre 50 ADCq y 140 ADCq



No existe un primer pico para los eventos de la banda electromagnética debido a que estos son los datos crudos, que incluyen todo el posible ruido de *afterpulses*. Usando el valor de VEM, se clasificaron los eventos por bandas de acuerdo al modo histograma. El valor máximo de muones que cruzan corresponde a la diagonal en el tanque. Usando las dimensiones de K'inich Ahau (114 ± 1 cm de altura y 41 ± 1 cm de diámetro), se obtiene un valor de carga máxima por muones que cruzan de 1.06 ± 0.04 VEM, o 201 ± 7 ADCq. Este valor no es diferente al encontrado para el VEM, lo que se puede interpretar como el hecho de que no hay diferencia apreciable entre la carga integrada por muones verticales (que atraviesan 114 ± 1 cm) y muones diagonales (que atraviesan 121 ± 4 cm).

XIII. MÓDULO DE CALIBRACIÓN, ANÁLISIS Y CLASIFICACIÓN

Los eventos cósmicos capturados y digitalizados por la electrónica de LAGO tienen la forma de pulsos discretizados en 12 intervalos (bins); cada intervalo corresponde a 25 ns debido a la velocidad de muestreo. Es necesario calibrar el detector y analizar los eventos antes de intentar clasificarlos con distintos algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje de máquina.

Para el aprendizaje supervisado se implementó un clasificador utilizando el algoritmo *Naïve Bayes*, el cual requiere etiquetar previamente los datos. Para ello se realizará la calibración del detector con la finalidad de poder clasificar los eventos con base en su carga para luego entrenar el clasificador.

En el caso del aprendizaje no supervisado se decidió utilizar el algoritmo de *k-means* y su variante el algoritmo *GMM-EM* (*Gaussian Mixture Model – Expectancy Maximization*), ambos métodos de agrupación de datos (*clustering*). En este caso es necesario que las variables seleccionadas para la clasificación (*features*) presenten una distribución linealmente separable, razón por la cual se realizará un análisis visual de los eventos para determinar su aplicabilidad a dichos algoritmos.

A. Análisis de eventos cósmicos

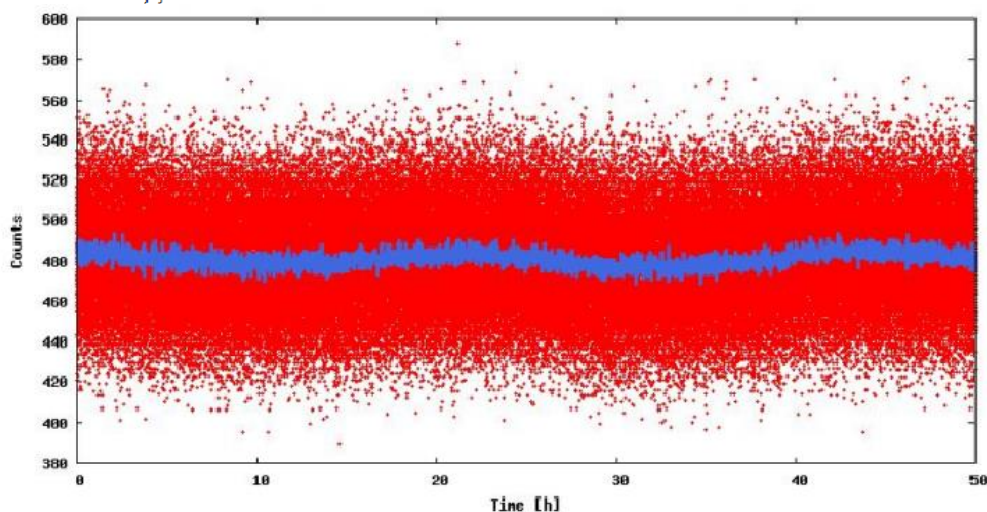
Existen muchas formas posibles de analizar los pulsos capturados; la Guía de la Electrónica de LAGO realiza tres procedimientos iniciales que proveen visualizaciones de los eventos para su posterior calibración y clasificación.

El primero es el análisis en modo *Scaler*, el cual es un método de detección para detectores de superficie que determina las tasas de conteo de pulsos en intervalos de tiempo. Estas tasas son corregidas posteriormente con base en los registros de presión y temperatura de la ubicación del detector. Se utilizó el siguiente código mencionado en la Guía: (Arnaldi, H., *et al.*, 2001)

Figura 91. Prueba del modo scaler de LAGO

```

bzcat nahuelito.bz2 | awk '{
if ($1!="#") {
  n++; # trace length
  if ($2>p) p=$2;
}
if ($1=="#" && $2=="t" && n==1) st++; #subtrigger
if ($1=="#" && $2=="t" && n==16) t++; #trigger
if ($1=="#" && $2=="t" && n==16 && p>150) bt++;
if ($1=="#") n=p=0;
if ($1=="#" && $2=="x" && $3=="h") {
  s++; # new second
  print s,st,t,bt;
  st=t=bt=0;
}}'
```



El cual despliega el conteo de eventos en un intervalo de 50 horas, junto con el promedio por minuto indicado por la línea continua azul. El código permite también graficar subtriggers y triggers mayores (bt) de los datos.

La segunda forma es el análisis en modo histograma, el cual permite el conteo de eventos con base en intervalos. Se realiza un conteo con base en la Amplitud (máximo ADC del pulso) y Carga (ADCq) de los datos capturados. Este modo es muy importante para la calibración del detector, dado que brinda las gráficas necesarias para determinar las cargas que separan las componentes electrónicas, muónicas y hadrónicas de las cascadas de área extendida. (Pérez, Y., 2015)

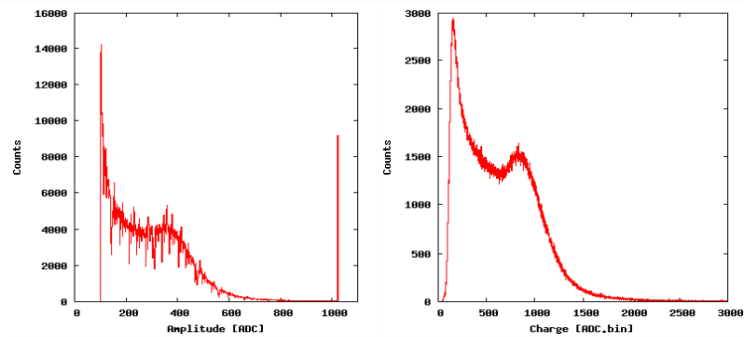
Para la obtención de los histogramas de la amplitud y carga se utilizó el siguiente código: (Arnaldi, H., *et al.*, 2001)

Figura 92. Prueba del modo histograma de LAGO

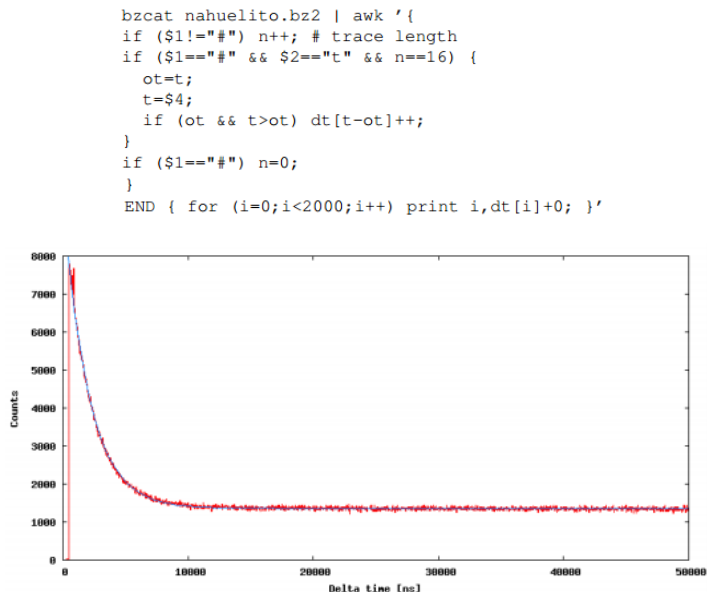
```

bzcat nahuelito.bz2 | awk '{
if ($1!="#") {
n++; # trace length
q2+=$2-50;
if ($2>p2) p2=$2;
}
if ($1=="#" && $2=="t" && n==16) {
q[q2]++;
p[p2]++;
q2=p2=0;
}
if ($1=="#") n=0;
if ($1=="#" && $2=="x" && $3=="h") {
s++; # new second
if (s==3600) {
for (i=0;i<4000;i++) print i,p[i]+0,q[i]+0;
exit;
}
}
}'

```



Un tercer análisis que se puede realizar de los datos es la obtención de la vida de un muón (τ_μ), partiendo de la gráfica de diferencias de tiempo entre eventos consecutivos detectados. Para ello se seleccionan los eventos que cumplan con $C_2 > C_1$, donde C_i corresponde a la carga de segundo y primer evento. Dicha gráfica presenta una fuerte correlación con una función de decaimiento exponencial. Se utilizó el siguiente código para la obtención de la mencionada gráfica: (Arnaldi, H., *et al.*, 2001)

Figura 93. Prueba del modo decaimiento de LAGO

B. Calibración de eventos cósmicos

La calibración del detector se realizó utilizando las gráficas generadas por los modos de Histograma (determinando la carga de las componentes electromagnética, muónicas y Hadrónicas) y decaimiento (buscando encontrar la vida media del muón).

Para encontrar las cargas que corresponden a cada tipo de evento se siguió la metodología mencionada en un artículo. (Allison, P. *et al.*, 2005) Luego de obtener el histograma de carga siguiendo la metodología expuesta en la Figura 10 se realizó un ajuste gaussiano para encontrar el máximo del segundo pico de la gráfica. Este pico corresponde a muones que atraviesan el tanque de forma vertical (debido a que existe una mayor probabilidad que las partículas lo atraviesen de esa manera). Con ello se logra obtener la carga equivalente a un muón vertical en el tanque implementado (Q_{VEM}). También se analizó el mínimo entre los picos del histograma (Q_{em-max}), correspondiente al fin de la componente Electromagnética e inicio de la componente muónica.

Luego de obtener la medida Q_{VEM} para el WCD se siguieron los procedimientos de otro trabajo para obtener la carga máxima posible de un muón con base en la geometría del tanque. (Pérez, Y., 2015) Dicha carga se encuentra con la siguiente fórmula:

$$Q_{\mu-max} = 0.9 * Q_{VEM} * \sqrt{1 + \frac{d^2}{h^2}}$$

En donde d es el diámetro del tanque y h es la altura del tanque. Con esta fórmula se obtienen los muones que atraviesan de forma diagonal el WCD (con mayor trayectoria, depositando más energía). Una vez obtenidos los parámetros Q_{em-max} y $Q_{\mu-max}$ se ha logrado diferenciar entre las componentes de rayos cósmicos; se puede notar que se cumple con $Q_{em-max} < Q_{VEM} < Q_{\mu-max}$.

Se ha determinado teóricamente que la vida promedio de un muón (τ_{μ}) es de $2.19703 \pm 0.00004 \mu s$. (Muheim, Franz, s.f.) Utilizando los datos obtenidos en modo decaimiento se siguieron los procedimientos encontrados en la literatura para intentar calcular experimentalmente τ_{μ} . Para ello se realizó un ajuste exponencial a los eventos graficados mediante $f(x) = b + n * e^{-x*T}$, donde b son los eventos de fondo, n es la constante de normalización y T es el tiempo de vida del muón τ_{μ} . (Alarcón, M., 1999)

1. Clasificación de eventos cósmicos. Con los resultados de la calibración del detector resulta trivial la generación de un conjunto de datos para el entrenamiento de un clasificador Bayesiano. Los eventos de la componente electromagnética corresponderán a aquellos con cargas $Q < Q_{em-max}$; la componente muónica serán los eventos con carga $Q \geq Q_{em-max}$ y $Q < Q_{\mu-max}$; y las cascadas Hadrónicas corresponderán a los que posean carga $Q > Q_{\mu-max}$. Se clasificarán también aquellos eventos con carga $Q \approx Q_{VEM}$ como muones verticales al tanque.

Los datos clasificados se dividen en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba, siguiendo las proporciones ideales mencionadas en la teoría (80%, 10% y 10%). Se procede a encontrar el factor \mathcal{L} que minimice el error de prueba y se selecciona como parámetro para el clasificador final. Posterior a ello, cada nuevo evento capturado puede ser clasificado inmediatamente, permitiendo seleccionar aquellos que sean de interés para su almacenamiento definitivo y transferencia al repositorio central de LAGO.

Para la clasificación no supervisada mediante agrupamiento o *clustering* se debe iniciar seleccionando las variables que formen el espacio bidimensional sobre el cual se

ejecutarán los algoritmos. Es importante seleccionar adecuadamente estas variables, para garantizar que los datos presenten cierto grado de separación natural que facilite su agrupamiento. Se optó por utilizar como principales variables la amplitud (máximo) del pulso y su tiempo de subida, ambas utilizadas en un estudio similar que logra identificar las tres componentes de los rayos cósmicos (sección 56). Otras variables sugeridas por el estudio son ADCq versus Amplitud y Amplitud versus ADCq/Amplitud.

Se generaron archivos distintos con los eventos capturados para cada espacio bidimensional de variables. Se utilizó el lenguaje Python para la lectura de los eventos, debido a su facilidad en manejo de cadenas y texto y por su amplio uso para finalidades científicas (además para permitir la compatibilidad con la Raspberry Pi).

Para obtener el tiempo de subida (0-99%) se realizó un ajuste gaussiano a los pulsos capturados, mediante el uso de la librería *lmfit* para Python. Se obtuvo el tiempo que correspondía al máximo de la regresión mediante el comando *argmax* de la librería de análisis de datos *numpy*. Para asegurar que la escala de tiempo estuviera en nanosegundos se realizó la regresión con un espacio de datos de 300 elementos (dado la electrónica de LAGO utiliza 12 intervalos de 25 ns, resultando en una duración total de 300 ns).

La obtención de la carga ADCq de los eventos se realizó integrando los 12 ADC que conforman el pulso. Para ello se utilizó la integración por trapezoide (*trapz*) proveída por la librería *numpy* para Python. La amplitud se obtuvo de forma trivial seleccionando el elemento máximo entre los ADC del evento. En ambos casos es posible realizar la conversión de ADC a voltaje siguiendo el factor de conversión de los PMT utilizados por la comunidad LAGO: (Pérez, Y., 2015)

$$1 \text{ ADC} \equiv \frac{2V}{2^{10}} = 1.95 \text{ mV}$$

Los 2V corresponden al rango de entrada del FADC implementado en la Tarjeta Digitalizadora y 2^{10} corresponde a los 10 bits de resolución de la digitalización. Cabe mencionar que para la nueva electrónica LAGO, utilizando la Red Pitaya, el valor de conversión será el siguiente (tomando en cuenta los 14 bits de resolución y el intervalo 1:1 de entrada FADC que utiliza):

$$1 \text{ ADC} \equiv \frac{2V}{2^{14}} = 0.122 \text{ mV}$$

Una vez generados los archivos están listos para aplicarles los algoritmos de Agrupación propuestos. Tanto el *k-means* como el *GMM-EM* fueron implementados utilizando la librería de aprendizaje de máquina para Python *scikit-learn*, debido a factores importantes como la eficiencia de los algoritmos, la documentación disponible y su compatibilidad con *numpy* y el resto de elementos del Megaproyecto.

C. Resultados

1. Modo Scaler para conteo de eventos. A continuación, se presentan las gráficas de conteo de eventos para ambas fechas, basados en el modo de detección Scaler:

Figura 94. Conteo de eventos para el 23 de agosto

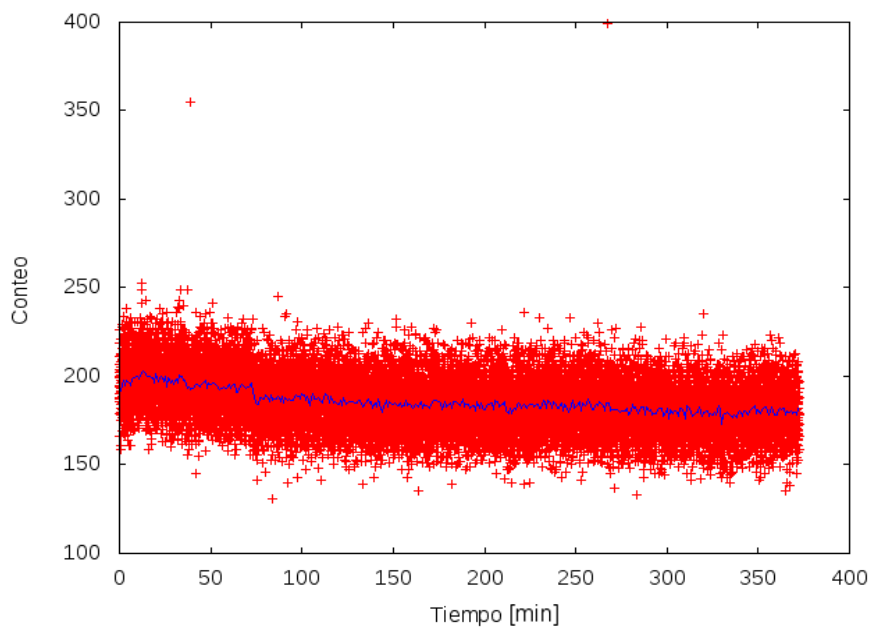
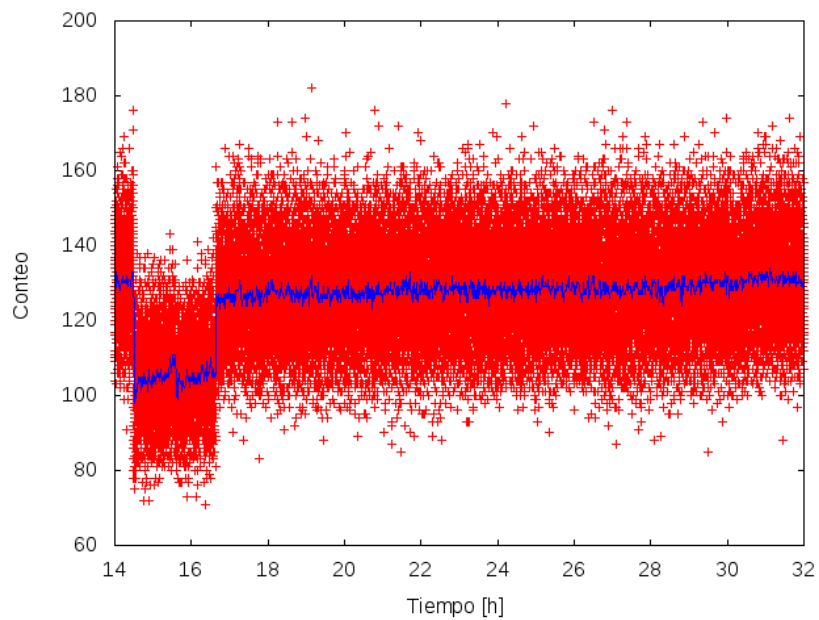
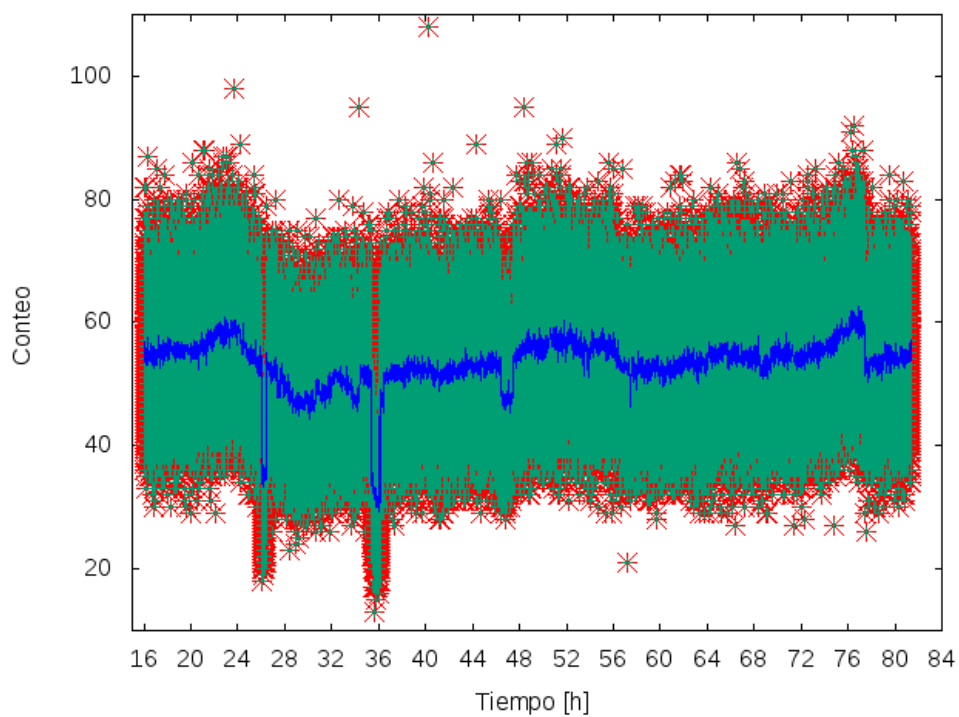


Figura 95. Conteo de eventos del 8 de octubre**Figura 96.** Conteo de eventos del 23 de septiembre

2. Modo histograma para calibración. Las siguientes gráficas corresponden a la Amplitud y Carga de los eventos para ambas fechas, basados en el modo de detección Histograma:

Figura 97. Histogramas de amplitud y carga del 23 de agosto

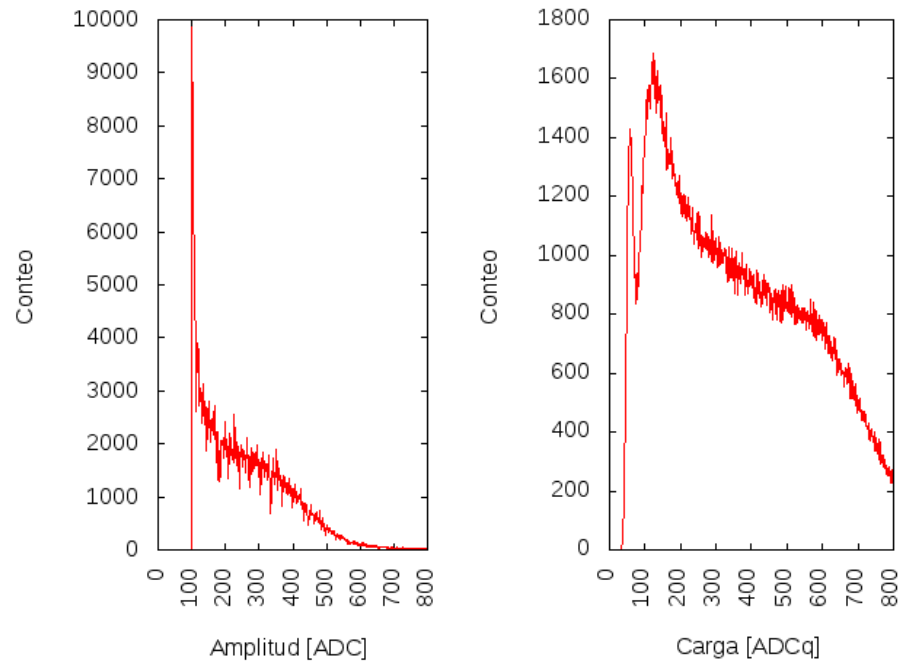
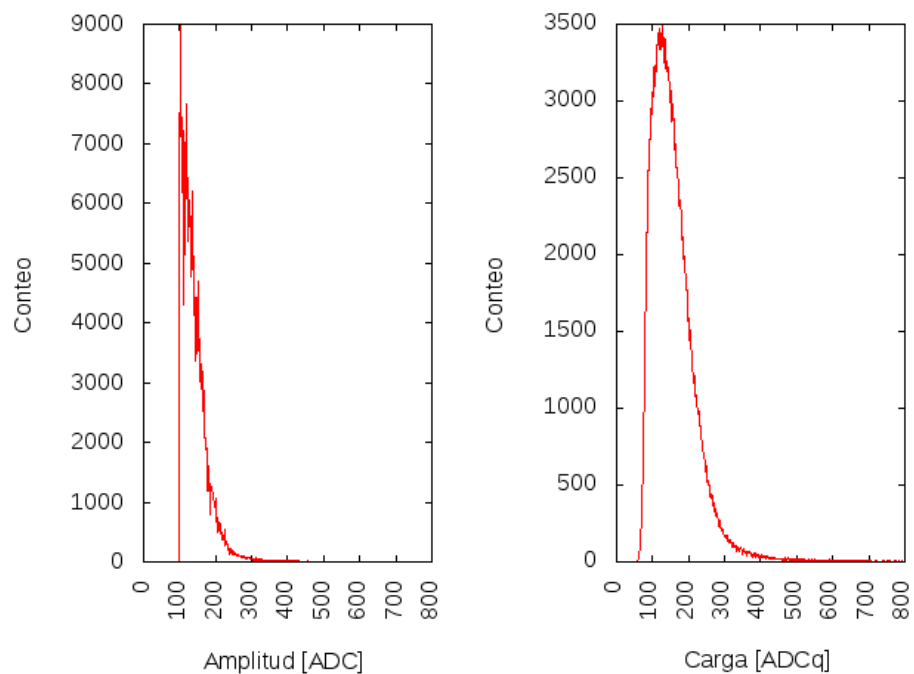
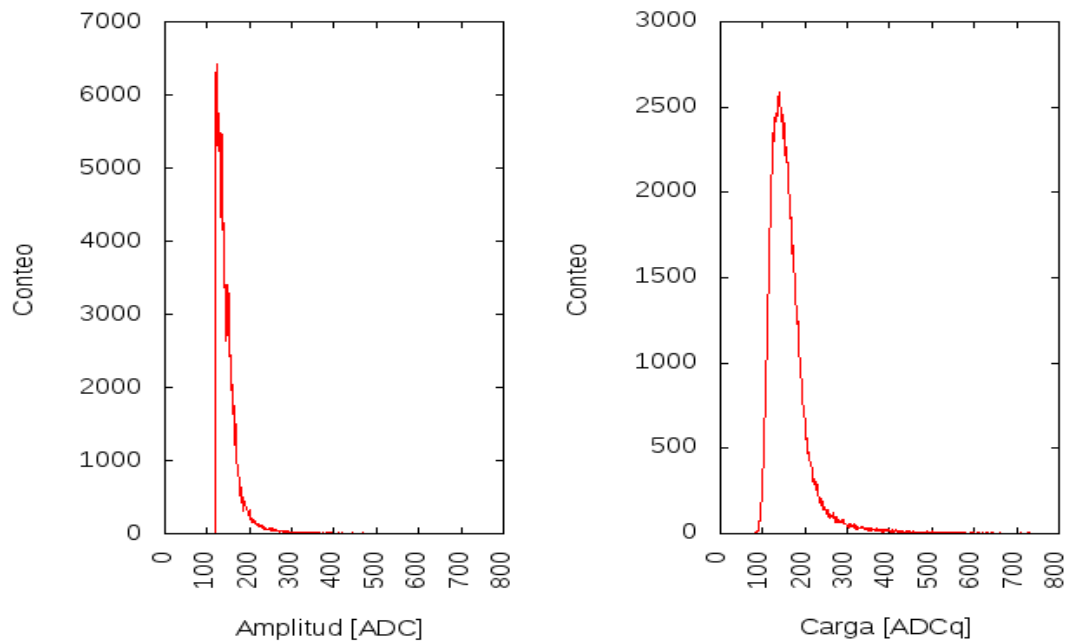
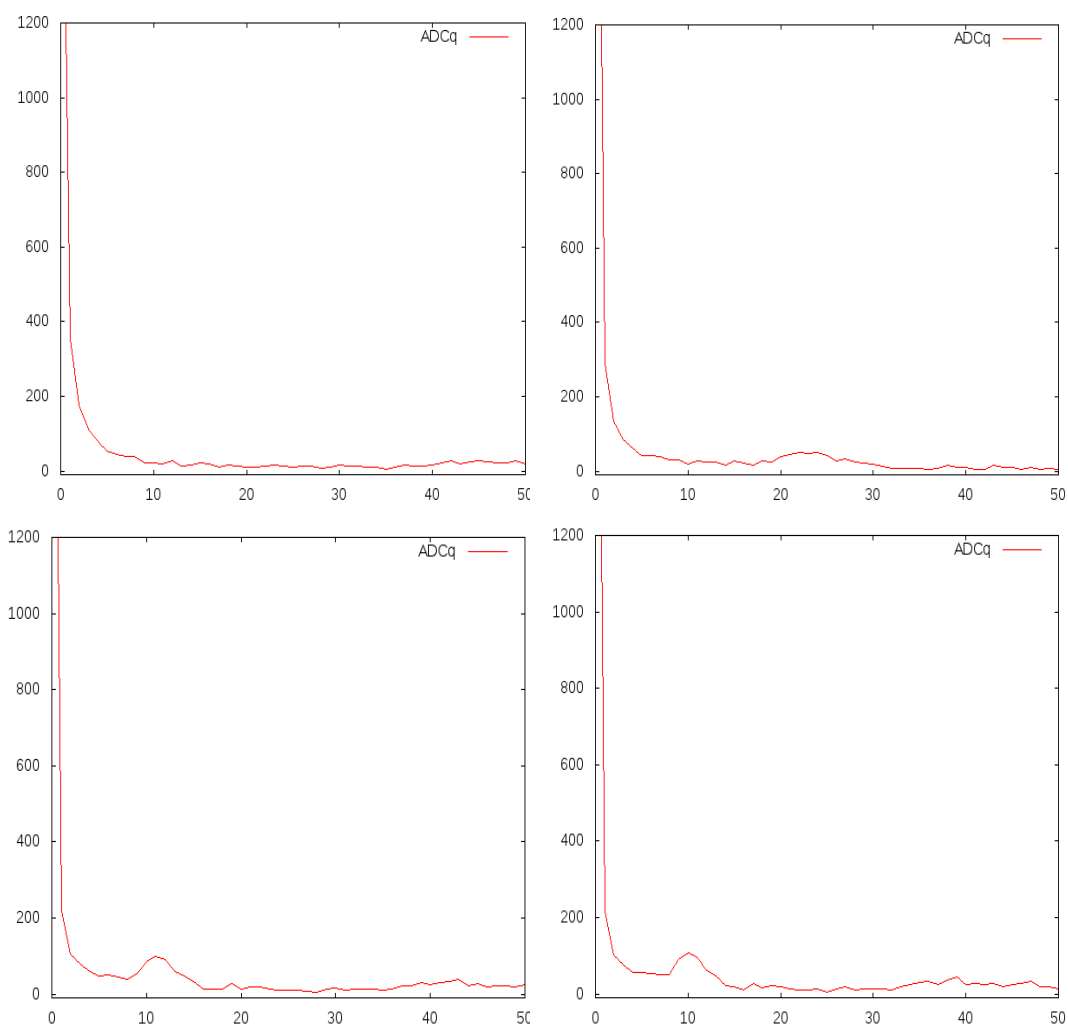


Figura 98. Histogramas de amplitud y carga del 8 de octubre**Figura 99.** Histogramas de amplitud y carga del 23 de septiembre

3. Histogramas obtenidos manualmente. Adicional a los histogramas generados con el procedimiento indicado en la Guía Oficial de Lago se realizaron cuatro histogramas similares, utilizando distintos intervalos de carga (en 5, 10, 22 y 25 nanosegundos). Ello con el objetivo de validar la carga máxima obtenida con distintas resoluciones de análisis. Los histogramas corresponden a los eventos del 23 de agosto.

Figura 100. Histogramas de carga en distintos intervalos del 23 de agosto



4. Modo decaimiento por vida media del muón. De similar forma se realizaron las gráficas de diferencia de tiempo entre eventos detectados, con la finalidad de encontrar el decaimiento exponencial que se ajuste a la vida media de un muón (2.197 microsegundos):

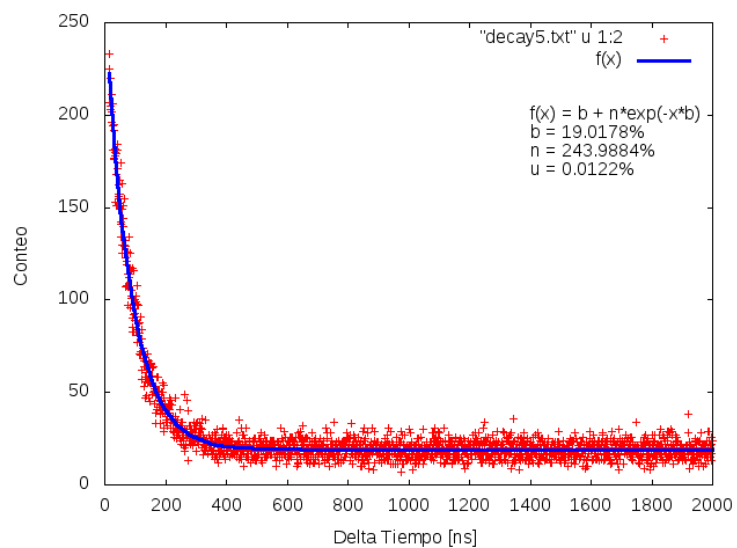
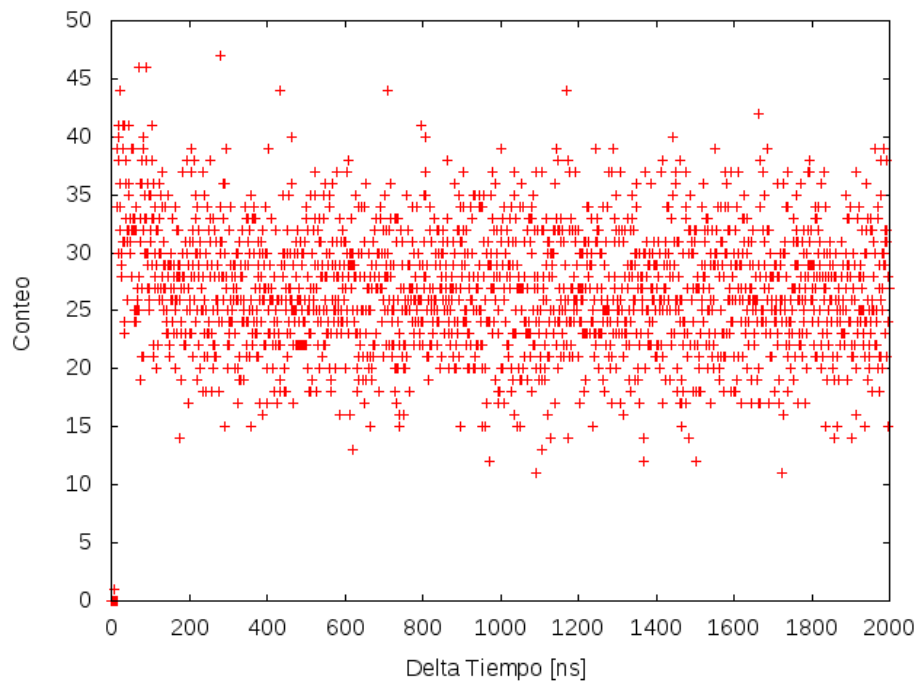
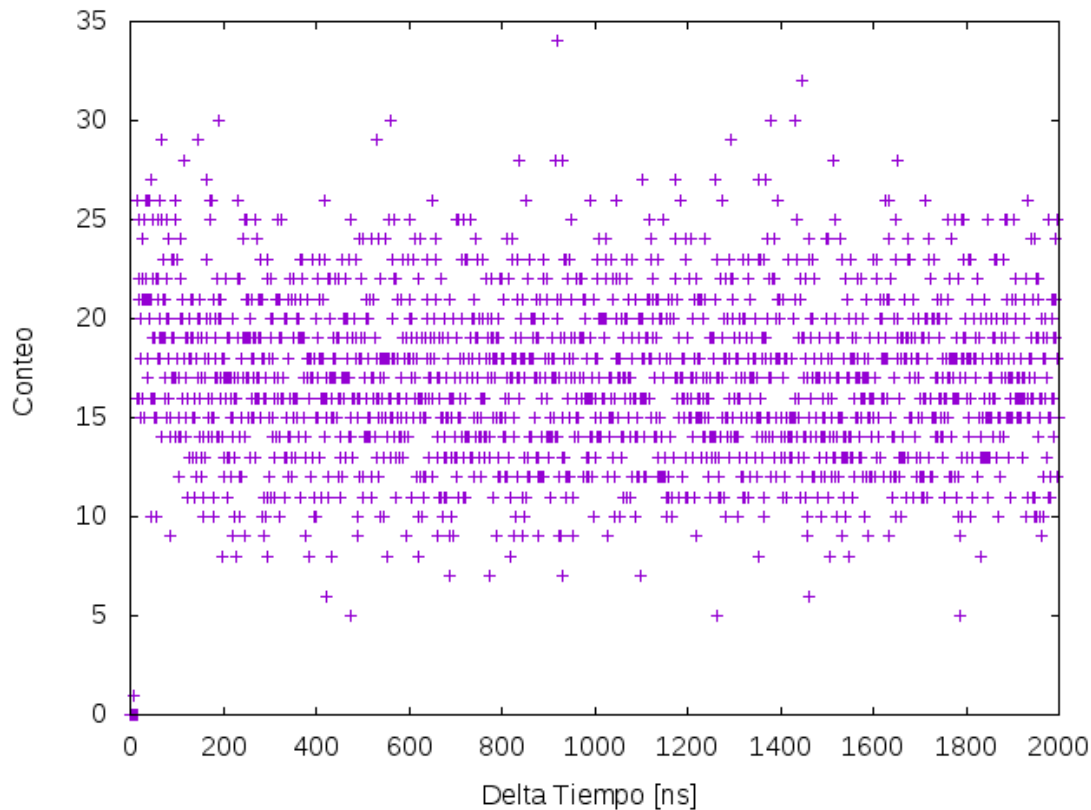
Figura 101. Conteo de tiempo entre eventos consecutivos del 23 de agosto**Figura 102.** Conteo de tiempo entre eventos consecutivos del 8 de octubre

Figura 103. Conteo de tiempo entre eventos consecutivos del 23 de septiembre

5. Modos de detección en Raspberry Pi. Las tres gráficas correspondientes a los modos de detección para los datos capturados por la Raspberry Pi se presentan a continuación. Es importante mencionar que esos datos fueron tomados con el PMT fuera del agua (detectando luz Cherenkov emitida por partículas atravesando el aire).

Figura 104. Modo decaimiento en datos de Raspberry Pi

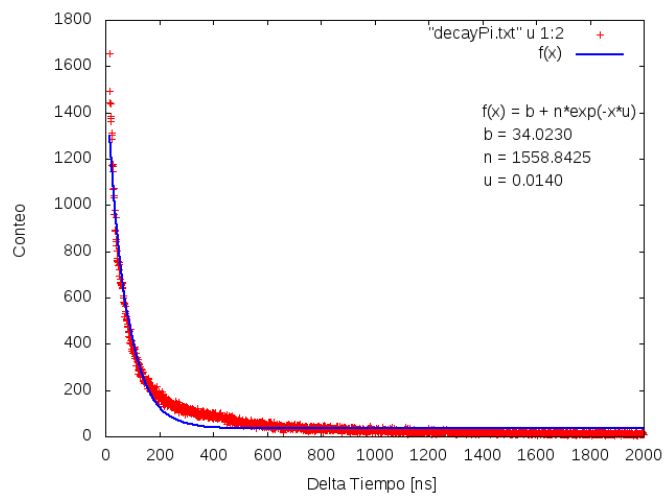


Figura 105. Modo histograma en datos de Raspberry Pi

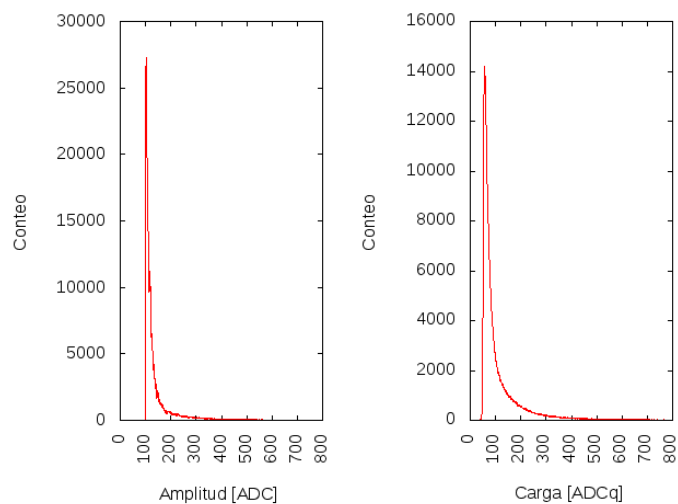
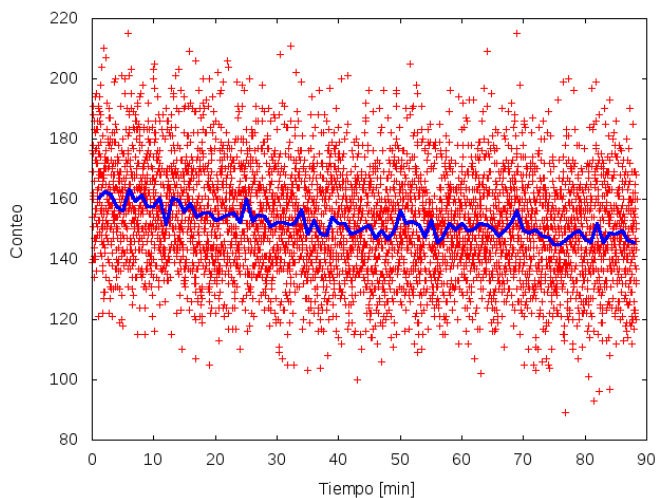


Figura 106. Modo scaler en datos de Raspberry Pi

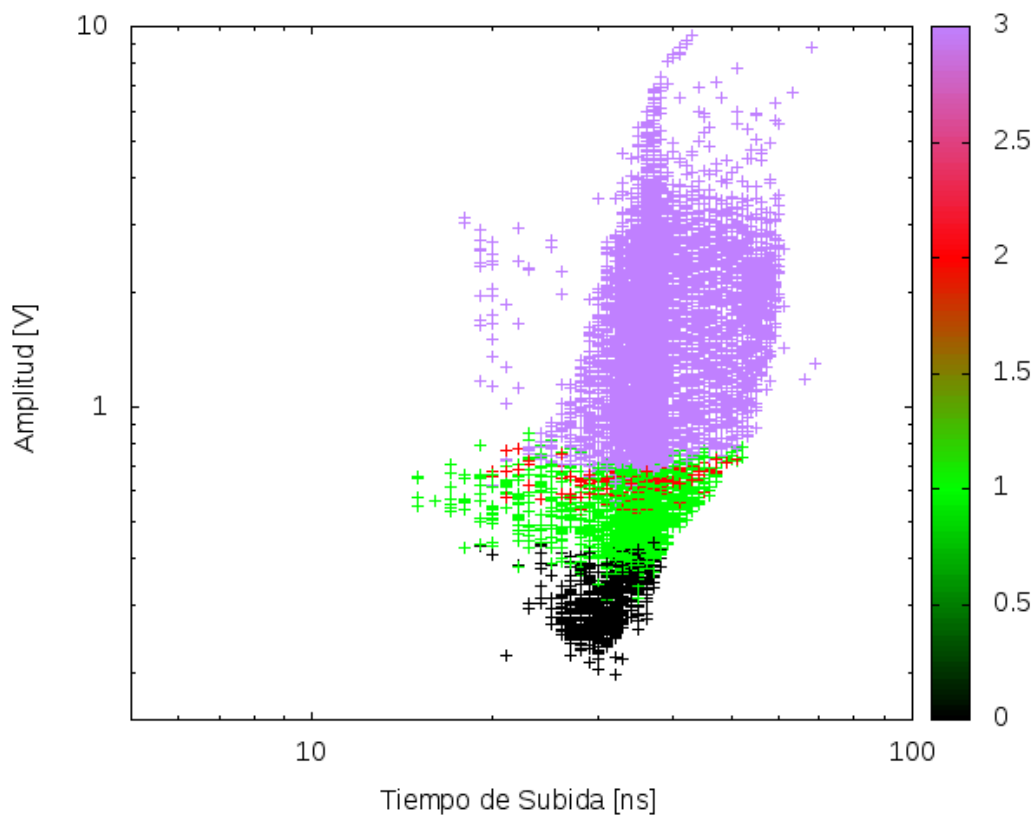
D. Clasificación de eventos cósmicos

1. Clasificador Bayesiano con alisamiento. A continuación, se despliegan los resultados durante el entrenamiento y prueba del clasificador Bayesiano. Luego, se presentan los datos clasificados según el resultado obtenido.

Cuadro 30. Resultados del entrenamiento del clasificador Bayesiano

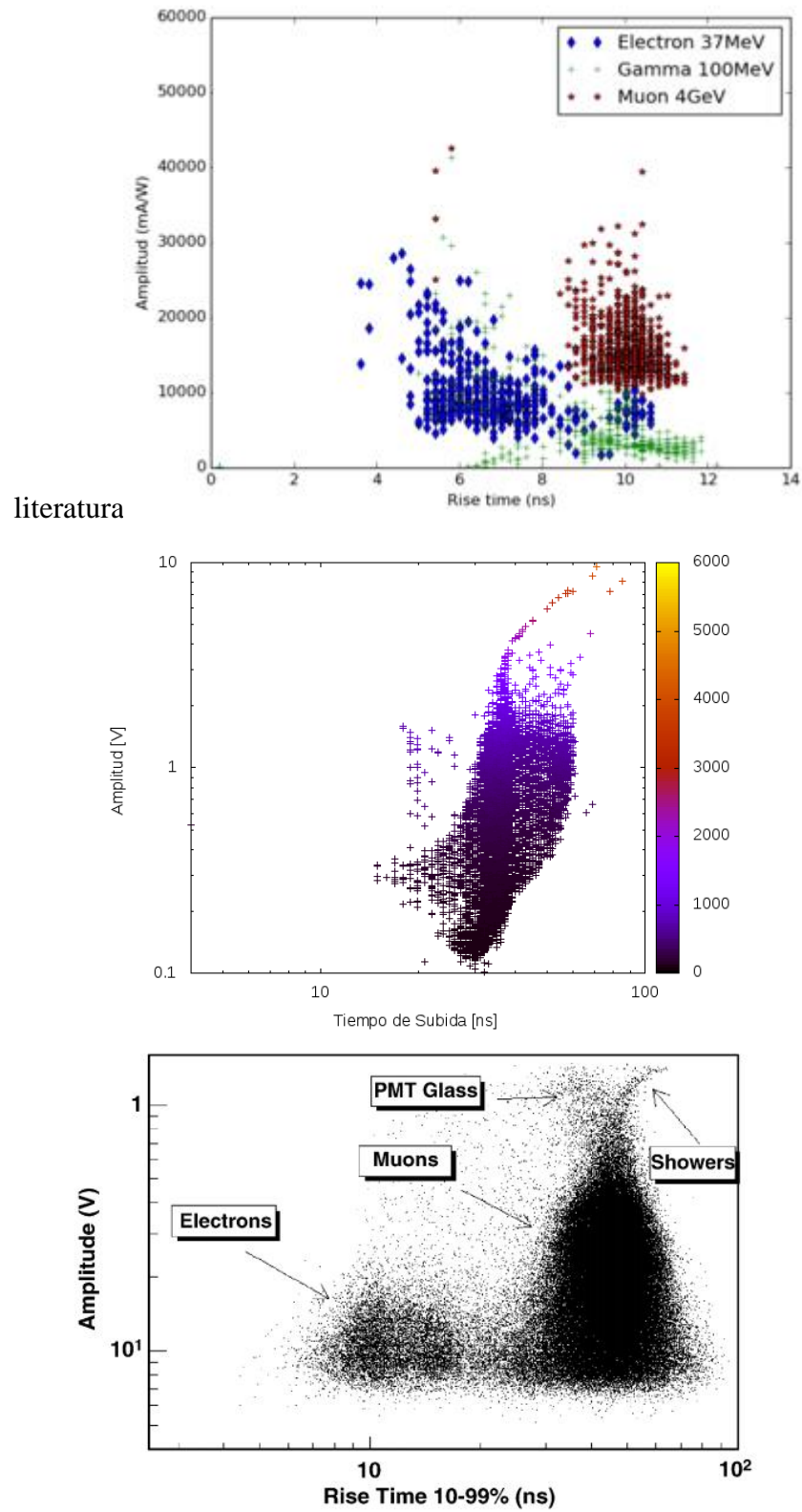
Etapa	Valor \mathcal{L}	Rendimiento (%)
Validación	0.5	0.8599
Validación	10.0	0.8597
Validación	20.0	0.8595
Prueba final	0.5	0.5456
Validación 2	340.0	0.89023
Validación 2	350.0	0.89030
Validación 2	360.0	0.89017
Prueba final 2	350.0	0.88605
Validación 3	0	0.90061
Validación 3	10.0	0.90556
Validación 3	20.0	0.90262
Prueba final 3	10.0	0.90079

Figura 107. Clasificación bayesiana aplicada a eventos cósmicos, mostrando carga integrada ascendente con el color



2. Clasificación no supervisada. A continuación, se muestran los resultados del intento de Separación de los pulsos mediante la comparación de su amplitud y tiempo de subida. Se exponen los resultados obtenidos por la simulación, los resultados obtenidos con los datos de agosto 23 y los resultados del artículo del cual se siguió la metodología:

Figura 108. Comparación de la separación de datos simulados, experimentales y de la



Se presenta a continuación el resultado del algoritmo knn aplicado a los datos separados del 23 de agosto (gráfica del medio en la Figura 27). Se intentó el algoritmo con $k = 3$ y con un $k = 4$:

Figura 109. Resultado de algoritmo KNN para K=3

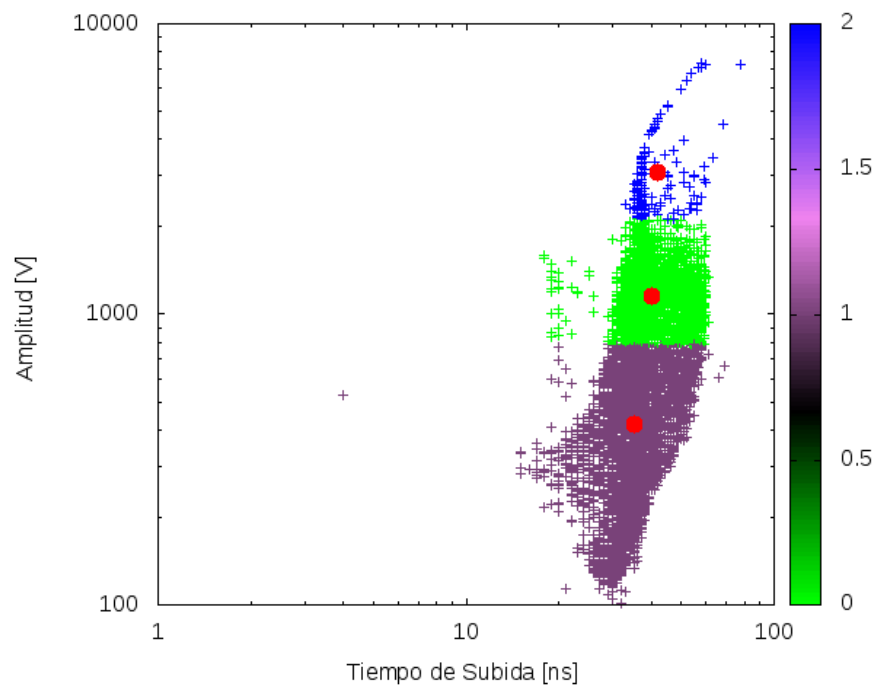
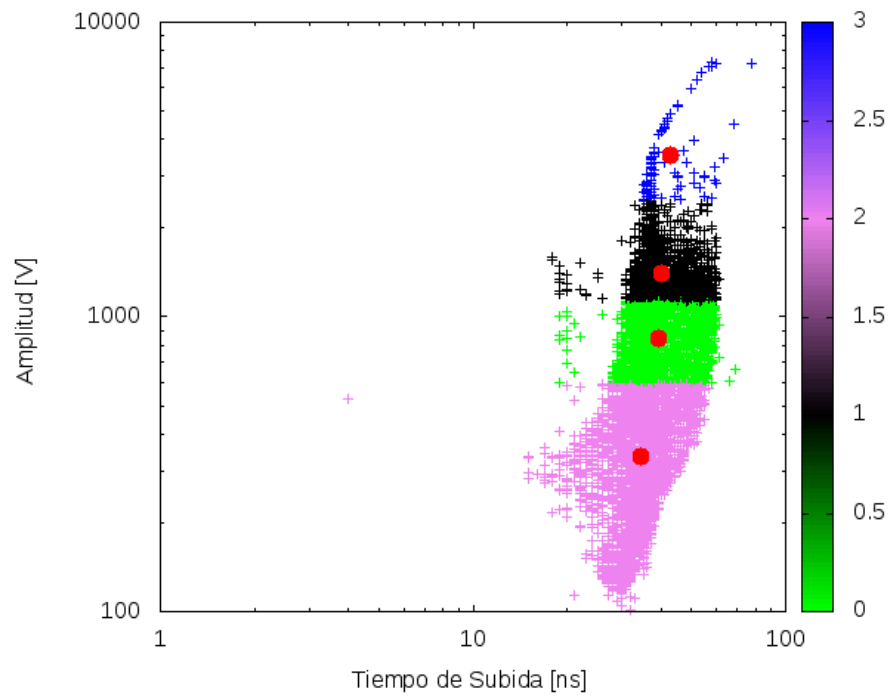
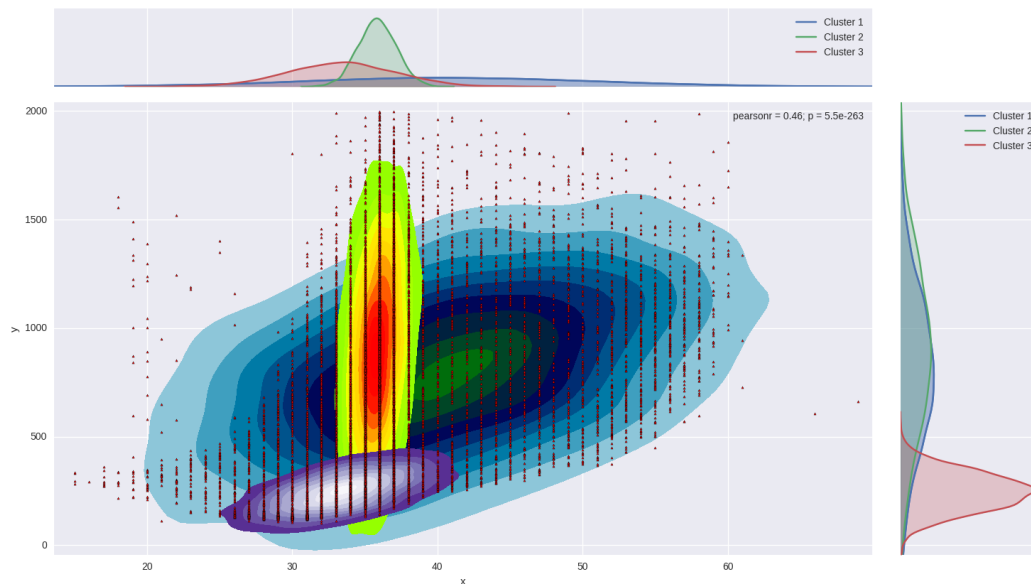
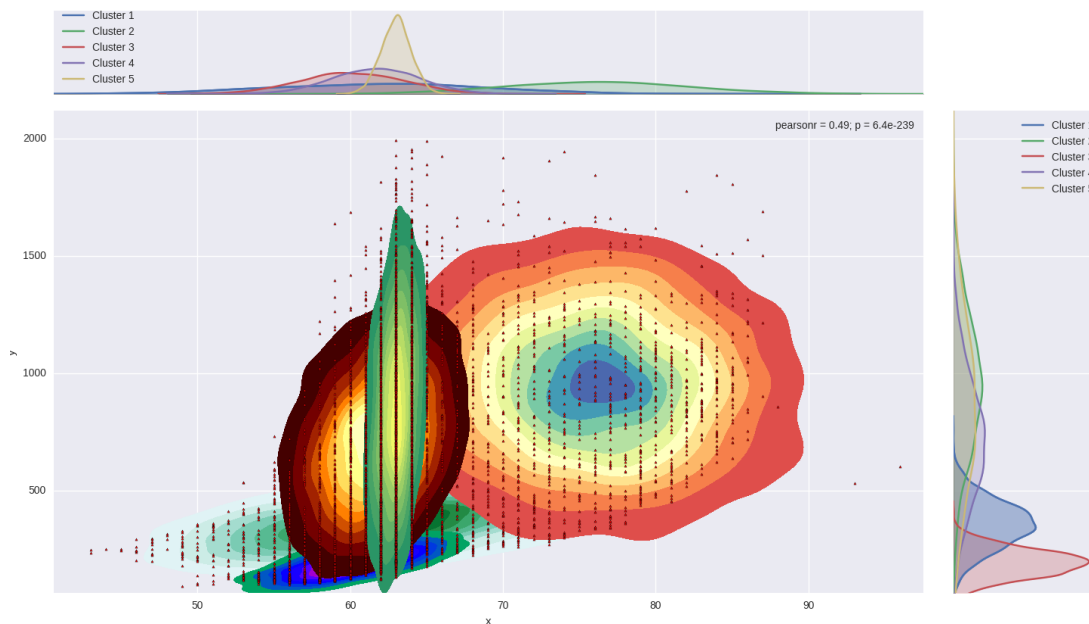


Figura 110. Resultado de algoritmo KNN para K=4



De manera similar se presenta a continuación los resultados de la clasificación mediante al algoritmo *EM-GMM*, para $k=3$ y $k=5$:





E. Discusión del módulo

La construcción del WCD fue probablemente la parte más trabajosa del presente megaproyecto. La obtención de los materiales requeridos fue compleja y costosa, ya que implicó en muchas ocasiones la compra en el extranjero de los mismos, como lo fue en el caso de la Raspberry Pi, el módulo GPS y de Presión y Temperatura y la tarjeta NEXYS 2. Incluso, el PMT Photonis del primer tanque fue traído por el Ing. Horacio Arnaldi, con sumas precauciones debido a la sensibilidad del instrumento. Al momento de utilizar el PMT Photonis por primera vez se encontró la fuente de alto voltaje de la base del fototubo se había quemado. Fue necesario adquirir una nueva fuente de emergencia para poder continuar con las pruebas.

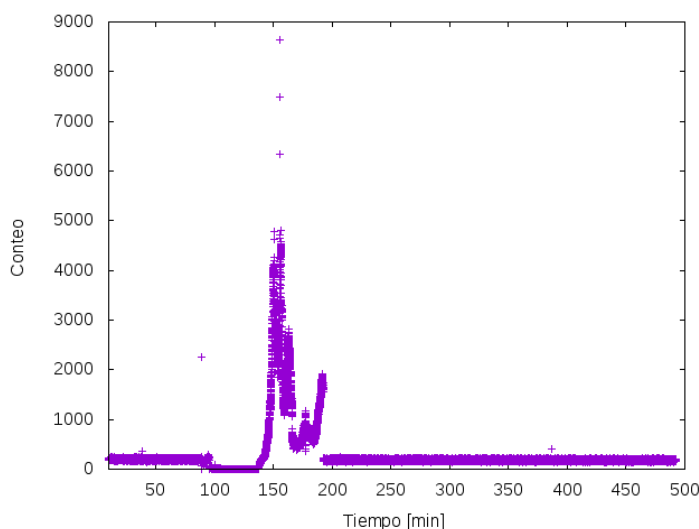
La metodología a utilizar para la construcción fue otro aspecto difícil de decidir, dado al inicio no se contaba con el conocimiento de los estándares de la comunidad LAGO (por no contar con acceso a la Wiki y Guía oficial). Con la visita del Ing. Arnaldi se logró

acceder a estas fuentes de información que permitieron definir una metodología apropiada.

La correcta implementación del detector se evidencia con la obtención de las gráficas para cada uno de los modos de detección, dado éstas presentan un fuerte parecido a los resultados esperados según la Guía. La obtención de las gráficas puede considerarse como una prueba de instalación exitosa del sistema ACQUA de adquisición de datos, cumpliendo con la parte de Detección del Objetivo General del Megaproyecto.

En los resultados se expusieron figuras correspondientes a dos tomas de datos independientes: una con agua del servicio público y otra con agua tratada. El agua tratada contaba con un conjunto de químicos adicionados que garantizaban la ausencia de microorganismos que afectaran la detección de pulsos pero que no afectaban las propiedades físicas y químicas del agua que permiten la emisión de luz Cherenkov. Se esperaba obtener una mejor calidad de eventos detectados, así como una constancia prolongada de los mismos (dado no habrá incremento de microorganismos con el paso del tiempo, afectando cada vez más a la detección en caso de no controlar dicho aspecto).

Se puede observar el conteo de eventos detectados en función del tiempo, para los datos del 23 de agosto (Corrida 1) y los datos del 8 de octubre (Corrida 4). Se puede notar un fuerte parecido entre ambas, sugiriendo que el agua tratada no afectó seriamente el conteo de eventos. En la **Figura 94** se puede observar un decrecimiento ligeramente inusual cerca del minuto 75. Esta irregularidad se debió a que se removieron algunos datos capturados de la Corrida 1, dado se encontró un aumento extremo de los eventos capturados que afectaban el resultado del conteo. Se puede observar que luego de remover los datos erróneos (entre el minuto 100 y 200) la gráfica retiene su tendencia natural.

Figura 111. Error en conteo de eventos del 23 de agosto

En la **Figura 111** se puede observar el conteo de datos totales de los eventos capturados esa fecha. Se observa un decremento significativo de eventos detectados, seguido de un incremento dramático y un período de inestabilidad. Momentos previos al minuto 200 (aproximadamente después de las 13:00h) la detección de eventos retornó a su conteo normal. Consultando con el equipo LAGO-UVG se logró deducir que se pudo deber a un incremento en la luz de ambiente que afecta el tanque, debido a una mayor incidencia de radiación solar de forma directa al tanque. Se reforzó la cobertura del tanque para evitar futuras fugas.

Observando detenidamente las figuras **Figura 94**, **Figura 95**, **Figura 96** se puede notar una diferencia interesante en la cantidad promedio de eventos detectados. El 23 de agosto se tiene un promedio cercano a 200; el 23 de septiembre se obtuvo un valor cercano a 60; y el 8 de octubre se obtuvo un valor aproximado de 130. El valor reducido obtenido en los datos del 23 de septiembre se atribuye a un error sistemático de la preparación del tanque para ese momento. Posterior a una inspección física se pudo observar que el recubrimiento Tyvek del tanque estaba dispuesto de manera incorrecta. Además, el nivel de agua en el tanque no era el suficiente para cubrir completamente el PMT. Estos factores ocasionaron una fuga de fotones, dado el Tyvek no pudo reflejarlos adecuadamente y además se contaba con menos nivel de agua, afectando los pulsos detectados, lo cual se tradujo en un conteo reducido de eventos. Se corrigieron éstos

factores y se realizaron pruebas adicionales el 8 de octubre, momento en el cual se puede apreciar se obtuvo una mayor cantidad de eventos (130 promedio). A pesar de realizar las correcciones se puede notar que el conteo difiere a los obtenidos con el agua del servicio público (23 de agosto). La menor cantidad de eventos se puede atribuir al agua tratada que se utilizó en la corrida de octubre, sugiriendo no cumplió a cabalidad su objetivo.

Se puede concluir algo similar observado las Figuras 17, 18 y 19 correspondientes al conteo de amplitud y carga de los eventos capturados. Nótese que en la Figura 17 se puede apreciar notablemente una forma similar a los resultados esperados de ejecutar el modo de detección Histograma de la Guía LAGO, en donde se puede observar los mínimos y máximos necesarios para la calibración del detector. No obstante, en las Figuras 18 y 19 no se aprecian éstos aspectos. Ello imposibilita la calibración del detector utilizando esos datos. Coincidentemente, las Figuras menos relevantes corresponden a las tomas de datos con el agua tratada.

Este fenómeno se observa notoriamente en las Figuras 21, 22 y 23 del modo de detección decaimiento, de las cuales sólo la 21 (correspondiente a los eventos del 23 de agosto con el agua del servicio público) presenta una tendencia exponencial apreciable. En las Figuras 22 y 23 resulta impráctico realizar un ajuste exponencial debido a la poca correlación que poseen los datos. Analizando el ajuste realizado a la Figura 21 resaltan los valores $b = 19.017$ y $u = 0.0122$. El valor b (línea base o *baseline*) corresponde a ruido de fondo de eventos detectados. El valor u corresponde al factor de decaimiento exponencial, el cual aproxima la vida promedio de un muón. Comparando este valor con la vida teórica del muón (2.197 microsegundos) con el valor u obtenido se puede notar que no logra aproximar de forma exacta dicho valor. Ello se debe probablemente a la escala utilizada para la regresión, pudiendo afectar al momento de hacer la regresión para u (propagación de error). También se le atribuye al hecho que se realizó el análisis de Decaimiento con todos los eventos detectados en esa corrida; realizar un filtrado previo seleccionando sólo los eventos muónicos (con ayuda de los algoritmos expuestos en la presente) se prevé ayudará considerablemente a la regresión obtenida. También realizar la regresión por otros medios puede ayudar a la exactitud de la misma. Otra fuente de error importante es la ubicación del WCD, el cual está dispuesto cerca del edificio C de la

Universidad del Valle de Guatemala. Debido a la sensibilidad de los instrumentos es muy recomendable tener un espacio especialmente designado y considerado para ubicar éste tipo de instrumentos. Ello debido que factores como el ruido causado por electrones provenientes del decaimiento y desprendimiento del concreto de los edificios (situación expuesta en el trabajo de Salazar, H. y Villaseñor, L.). Se considera que de realizar las pruebas aquí expuestas en otra ubicación se podrán obtener resultados más limpios.

De manera similar se realizaron las pruebas capturando los eventos con la Raspberry Pi. Para esas pruebas se realizó la toma de pulsos sin sumergir el PMT en agua, simplemente realizándolas con el aire como medio asegurando no hubiera fuga de luz que pudiera afectar la prueba. Se puede observar en las Figuras 24, 25 y 26 los resultados obtenidos para los tres modos de detección utilizados. La Figura 26 presenta el conteo de eventos a lo largo del tiempo que duró la prueba, donde se puede observar un promedio cercano a 160 (con una tendencia decreciente). Con base en la teoría se puede esperar ver un menor conteo de eventos detectados con el aire como medio. Ello se debe a las propiedades físicas del aire versus las del agua, teniendo ésta última una menor velocidad de fase para la luz (es decir, la luz viaja más rápido en el aire que en el agua). Con ello podemos concluir que una partícula deberá tener mayor energía para poder producir el efecto Cherenkov en el aire, lo que se traduce en una tasa de detección menor debido a que existen menos eventos con tales energías. La Figura 25 presenta el histograma de amplitud y carga, pudiéndose observar que no cuenta con los factores importantes para la calibración del detector. Naturalmente, esto se debe también al medio utilizado para la detección. En el caso de modo Decaimiento, expuesto en la Figura 26, se aprecia un resultado aceptable; incluso muy similar al obtenido con el agua del servicio público. Finalmente se logró realizar una captura de datos correcta con la Raspberry Pi, mas no se optó por utilizarla activamente para las pruebas dado cuenta con menor capacidad de procesamiento que una computadora de laboratorio, pudiendo verse saturada por los datos de la Electrónica. Además, dado la Raspberry se conecta a internet inalámbricamente se debe contar con una señal bastante fuerte para poder garantizar que todos los eventos pudieran transferirse a algún lugar (como una computadora local o el Repositorio de Colombia). Es por ello que se requiere una mejor implementación de

adquisición para Raspberry, en un lugar con condiciones más adecuadas y coordinado con el sensor de presión y temperatura.

Los factores mencionados anteriormente sugieren fuertemente que el agua tratada tuvo un efecto negativo imprevisto en la detección de eventos (se obtuvieron mejores resultados con el aire que con el agua tratada). Se considera que pudo ingresar contaminación al momento de llenar el tanque, previo a la ejecución de la captura de los datos. Ello pudo afectar bastante los resultados obtenidos en la calidad del agua, repercutiendo en la emisión de radiación Cherenkov que una partícula pueda dejar en su paso por el detector.

Respecto al resultado obtenido con el Clasificador Bayesiano se puede considerar se obtuvo resultados aceptables (Figura 27 y Cuadro 30). Se obtuvo un performance final del 56%, el cual puede no satisfacer inicialmente al lector, pero considerando que el conjunto de categorías en la clasificación Bayesiana estaba conformando por cuatro elementos (eventos electromagnéticos, eventos muónicos, eventos muónicos verticales y lluvias hadrónicas) el resultado obtenido es por lo menos 100% mejor que la probabilidad de un performance totalmente *naïve* (adivinar con un 25% de éxito). Posterior a esos resultados se realizaron pruebas adicionales y se logró obtener un mejor resultado del 90% de performance final. La mejora se atribuye a una separación más rigurosa y adecuada de los eventos utilizados para los archivos de entrenamiento, validación y prueba (en las primeras pruebas no se siguió la proporción ideal de 80-10-10). No es de sorprender el hecho que se obtuvieran buenos resultados a pesar de los aspectos indeseados que pudiera presentar la data, dado esto es común debido a la versatilidad del acercamiento Bayesiano utilizado (según se ilustra en el libro de Russel y Norvig citado). Una mejora al método sería intentar otros tipos de alisamiento para mejorar el resultado, así como realizar varias mezclas del conjunto de datos para garantizar la independencia del entrenamiento.

Respecto al clustering de eventos se obtuvieron resultados muy interesantes, observables en las Figuras 29 y 30. Se puede notar que a pesar de que las pruebas de análisis de los datos indicaran visualmente que sólo se contaba con un conjunto identificable de datos el algoritmo logró clasificar una tendencia para $k=3$ y $k=4$,

notablemente lineal respecto a la amplitud. Lo más destacable es que ésta tendencia lineal mostró similitud con los datos del Clasificador Bayesiano mencionado anteriormente, el cual también mostraba una tendencia lineal en su clasificación de los datos. Se recomienda fuertemente que se realicen más análisis de ésta variable de los eventos, así como incluir adicionales como Carga del evento (ADCq) o Delta Tiempo del evento anterior.

La Figura 28 presenta una comparación entre los resultados obtenidos por una simulación realizada en GEANT4 (C++) de los posibles eventos cósmicos incidentes en el tanque, los resultados experimentales obtenidos, y los resultados de separación que se encontraron en el trabajo citado de H.Salazar y L. Villaseñor (2005). Hay un fuerte parecido con los eventos de las Lluvias (nótese la cola en la parte superior de la Figura 24). La simulación se parece a la del artículo ya que muestra una clara separación entre eventos producidos por electrones y por muones. Los datos experimentales no presentan esta separación en las componentes (con tiempos de subida alrededor de 10 ns). Un factor a considerar en los datos experimentales es la velocidad de muestreo utilizada por la electrónica (intervalos de 25 ns). Debido al teorema de Nyquist es que no es posible realizar una detección exacta de éstos eventos, dado se escapan de la velocidad de detección del WCD implementado. La nueva electrónica permitirá resolver ese problema al implementar una velocidad de muestreo superior, permitiendo obtener intervalos (bins) de 8 nanosegundos. Ésa cantidad es más adecuada para la detección del tipo de eventos mencionados (Correspondiente a la componente Electromagnética, debido al decaimiento de muones o bien por ruido de fondo). Los *features* seleccionados son adecuados para la clasificación de los datos, más se requiere de la nueva electrónica para que su aplicación sea más significativa (sólo se cuenta con un cluster visible por ahora).

No se incluyó en resultados, pero sí se logró trabajar con la nueva electrónica de LAGO. Se asistió en las pruebas con la RedPitaya, utilizando el lenguaje C++ para la utilización de las funcionalidades provistas por el API de la misma. En un futuro se buscará construir un segundo detector con la nueva tecnología exclusivamente para comparar ambas tecnologías. En las pruebas se logró recibir pulsos del mismo detector

implementado, indicando la factibilidad de explorar esa tecnología. Se prevé trabajar en ello a futuro.

XIV. MÓDULO DE GESTIÓN DEL PROYECTO

La presente se enfoca en la aplicación de los procesos de la Gestión de Proyectos en la tercera fase del proyecto, que incluye la construcción de un segundo detector. Se trabajaron 35 de los 47 procesos del PMBOK. El ciclo de vida identificado para este proyecto es incremental, con tres incrementos o fases. Las fases se dividen de la siguiente forma:

- Fase 1: se llevó a cabo de julio a noviembre del 2015, durante esta fase se familiarizó al equipo LAGO UVG con los conceptos necesarios para desarrollar el proyecto. Durante esta fase se recolectó información y algunos de los componentes de armado del primer tanque.

- Fase 2: se realizó de enero a mayo de 2016. Se lograron más avances respecto a la teoría física y química necesaria y también se determinó la necesidad de construcción de un segundo detector, con electrónica actualizada. En este incremento se realizaron actividades para adquirir fondos para cubrir las actividades de la tercera fase.

- Fase 3: consiste en la construcción de un detector funcional, de junio a noviembre de 2016. Este es el único incremento en donde se aplican las buenas prácticas de gestión de proyectos del PMI.

Los procesos de la dirección de proyectos se aplicaron por grupos, tomando en cuenta las diez áreas de conocimiento de la gestión de proyectos.

Cuadro 31. Procesos utilizados durante la implementación de la tercera fase del proyecto
LAGO UVG

Área	Procesos de iniciación	Procesos de planeación	Procesos de ejecución	Procesos de control	Procesos de cierre
Integración	Desarrollo del acta de constitución	Desarrollo del plan de dirección del proyecto	Dirección del trabajo del proyecto	Control integrado de cambios	Cierre de fase

Continuación Cuadro 31.

Área	Procesos de iniciación	Procesos de planeación	Procesos de ejecución	Procesos de control	Procesos de cierre
Alcance		<ul style="list-style-type: none"> • Plan de gestión del alcance • Recolección de requerimientos • Definir alcance • Creación de EDT 		<ul style="list-style-type: none"> • Validación del alcance • Control del alcance 	
Tiempo		<ul style="list-style-type: none"> • Plan de gestión del cronograma • Definir actividades • Secuenciar actividades • Estimar duraciones de actividades • Desarrollo del cronograma 		<ul style="list-style-type: none"> • Control del cronograma 	
Costo		<ul style="list-style-type: none"> • Plan de gestión del costo • Estimar costos • Determinar el presupuesto 		<ul style="list-style-type: none"> • Control de costos 	
Calidad		<ul style="list-style-type: none"> • Plan de gestión de la calidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Aseguramiento de la calidad 		
Recurso Humano		<ul style="list-style-type: none"> • Plan de gestión del recurso humano 	<ul style="list-style-type: none"> • Adquirir el equipo del proyecto 		
Comunicaciones		<ul style="list-style-type: none"> • Plan de gestión de las comunicaciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Manejo de comunicaciones 		
Riesgos		<ul style="list-style-type: none"> • Plan de gestión de riesgos • Identificar riesgos • Análisis cualitativo de riesgos • Análisis cuantitativo • Planes de respuesta a riesgos 			

Continuación Cuadro 31.

Área	Procesos de iniciación	Procesos de planeación	Procesos de ejecución	Procesos de control	Procesos de cierre
Adquisiciones		<ul style="list-style-type: none"> Plan de gestión de adquisiciones 	<ul style="list-style-type: none"> Realizar adquisiciones 		
Interesados	<ul style="list-style-type: none"> Identificación de los interesados 	<ul style="list-style-type: none"> Plan de gestión de los interesados 	<ul style="list-style-type: none"> Gestión de la participación de los involucrados 		

A. Iniciación

A continuación, se presentan los procesos de iniciación para la tercera fase del Proyecto LAGO. Nótese que estos documentos vienen influenciados por los conocimientos empíricos adquiridos durante las primeras dos fases del proyecto.

1. Identificación de los interesados del proyecto. Se realizó un registro de los interesados en el proyecto:

Cuadro 32. Registro de interesados en el proyecto

Nombre	Rol	Grupo	Contacto	Requerimientos	Influencia	Poder	Ranking
Zaida Urrutia	Patrocinadora	UVG	zdurrutia@uvg.edu.gt	Justificación de costos. Reportes de avances.	9	7	63
Daniel Conde	Análisis físico	Miembro LAGO UVG	con13375@uvg.edu.gt	Requiere detector funcional para análisis de datos.	10	6	60

Continuación Cuadro 32.

Nombre	Rol	Grupo	Contacto	Requerimientos	Influencia	Poder	Ranking
Luis Pinillos	Desarrollo de electrónica y diseño de tanque	Miembro LAGO UVG	pin12523@uv g.edu.gt	Especificaciones electrónicas. Componentes para armado.	10	7	70
Pablo Duque	Diseño de tarjetas de adquisición de datos	Miembro LAGO UVG	duq12145@u vg.edu.gt	Entradas de electrónica a usar, para diseñar la placa. Componentes para placa.	10	7	70
Karen Guarcax	Análisis químico del medio		gua13440@u vg.edu.gt	Tanque funcional. Distintos tipos de agua.	10	6	60
Miguel Novella	Transferencia y almacenamiento de datos	Miembro LAGO UVG	nov12164@u vg.edu.gt	Electrónica que transmita datos. Repositorio de datos LAGO.	10	6	60
Luis Mijangos	Asesor del MegaProyecto	UVG	lgmijangos@ uvg.edu.gt	Ejecución del proyecto	8	7	56
Horacio Arnaldi	Contacto directo LAGO, asesoría en electrónica	LAGO	<u>lharnaldi@gm</u> <u>ail.com</u>	Cumplimiento de estándares LAGO	7	8	56

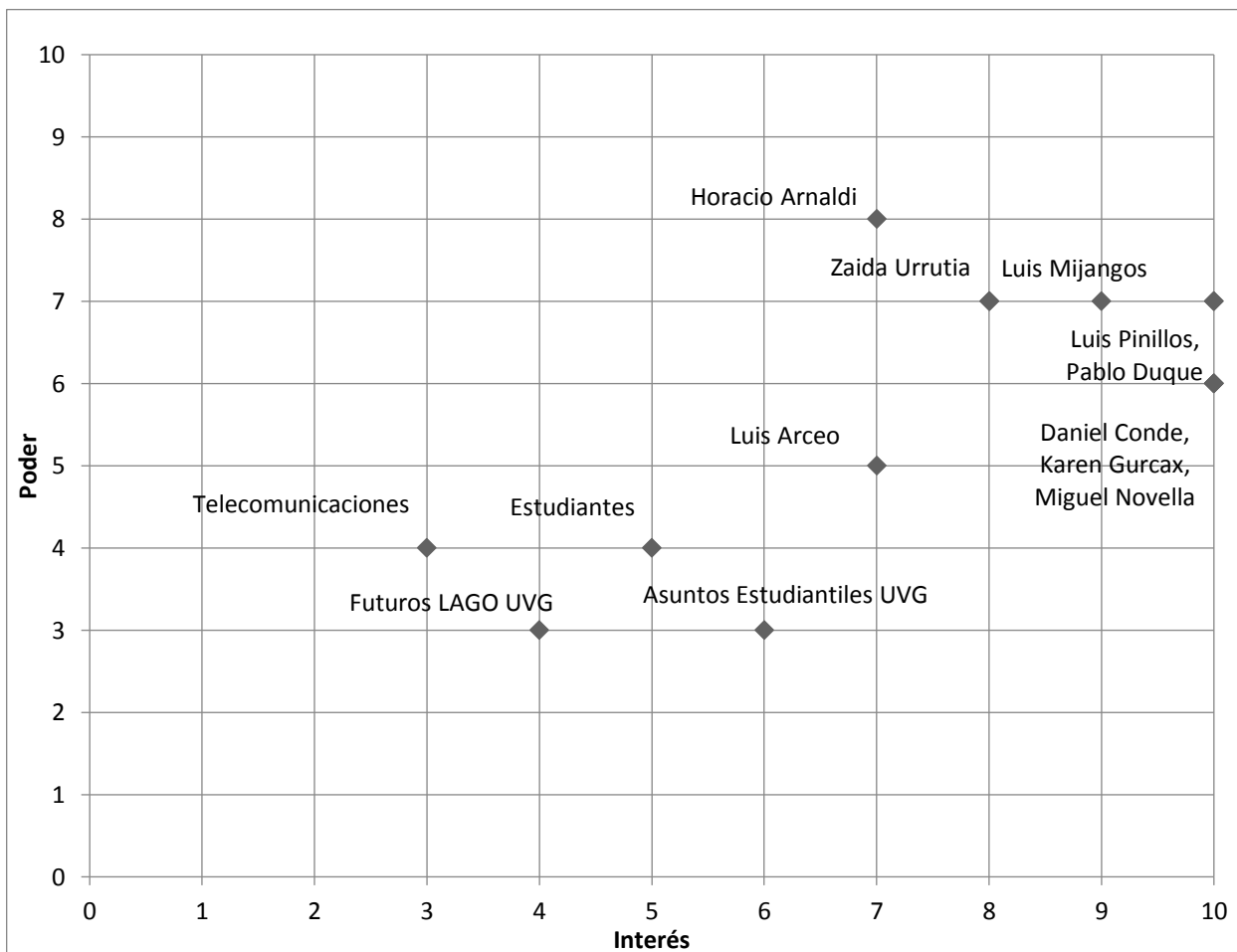
Continuación Cuadro 32.

Nombre	Rol	Grupo	Contacto	Requerimientos	Influencia	Poder	Ranking
Empresas de teleco - municaciones	Beneficiadas de la interpretación de datos obtenidos	Beneficiados	X	Pronósticos de eventos solares	3	4	12
Estudiantes guatemaltecos	Beneficiados con desarrollo tecnológico en Guatemala y acceso a prácticas de física de partículas	Beneficiados	x	Tecnología funcional	5	4	20
Luis Arceo	Asesor en electrónica externo	LAGO	miquel@fisica.ugt.o.mx	Documentación	7	5	35
Asuntos estudiantiles UVG	Facilitar permisos para actividades de recaudación de fondos.	UVG	mcespina@uvg.edu.gt	Justificaciones para actividades	6	3	18

Continuación Cuadro 32.

Nombre	Rol	Grupo	Contacto	Requerimientos	Influencia	Poder	Ranking
Hamamatsu	Proveedor japonés de fotomultiplicador	Proveedores	kikaku2@hq.hp.co.jp	-	8	7	56
Futuros miembros LAGO UVG	Continuadores del Proyecto a largo plazo.	Beneficiados	x	Documentación de todos los procesos en el proyecto.	4	3	12

Figura 112. Poder vs interés de interesados



B. Planificación

1. Plan para la dirección del proyecto. Se presentan los procesos de dirección de proyectos que se utilizan en la implementación de esta fase, agrupados por áreas de conocimiento y grupos de procesos.

Cuadro 33. Plan para la dirección del proyecto

Fase	Entregables
Iniciación	<ul style="list-style-type: none"> - Acta de constitución del proyecto - Definición de recursos humanos necesarios para el desarrollo del proyecto - Identificación de implicados
Planificación	<ul style="list-style-type: none"> - Planificar la dirección del proyecto - Recopilar requisitos o requerimientos del proyecto - Organizar los recursos humanos - Planificar el control de cambios - Definir el alcance del proyecto - Elaborar el diccionario de la EDT - Estimar tiempo de las actividades y desarrollar cronograma - Planificar las adquisiciones - Planificación de la gestión de la calidad - Estimar los costos - Identificación de riesgos - Análisis de riesgos y asignación de planes de respuesta - Planificación de las comunicaciones
Ejecución	<ul style="list-style-type: none"> - Efectuar la compra del material necesario para los detectores - Distribuir la información de manera constante - Desarrollo de la carta de ensamble para detectores - Aseguramiento de la calidad
Supervisión y control	<ul style="list-style-type: none"> - Controlar el trabajo realizado - Controlar los cambios - Validación del alcance - Control del alcance - Controlar los costos - Controlar el cronograma
Cierre	<ul style="list-style-type: none"> - Documentar lecciones aprendidas - Cierre formal del proyecto

Cuadro 34. Lista de procesos de dirección de proyectos utilizados en cada área de conocimiento, con las herramientas utilizadas

Área de conocimiento	Procesos	Herramientas y técnicas
Integración	<ul style="list-style-type: none"> - Acta de constitución del proyecto - Plan para la dirección del proyecto - Plan para el control de cambios 	<ul style="list-style-type: none"> - Plantilla para el acta de constitución del proyecto - Juicio de expertos - Sistema de información para la dirección de proyectos
Alcance	<ul style="list-style-type: none"> - Plan para el manejo del alcance - Recopilar requisitos para el proyecto - Definir el alcance - Diccionario de la EDT - Validación del alcance - Verificar y controlar el alcance 	<ul style="list-style-type: none"> - Grupos de opinión - Juicio de expertos - Identificación de alternativas - Desglose del trabajo - Inspección del alcance - Proceso del control de cambios
Tiempo	<ul style="list-style-type: none"> - Definir y secuenciar las actividades - Estimar los recursos y duración de las actividades - Desarrollo de cronogramas - Controlar el cronograma 	<ul style="list-style-type: none"> - Descomposición de las actividades - Determinación de las dependencias - Análisis de alternativas - Software Microsoft Project - Estimación por tres valores - Análisis de red del cronograma - Método de la ruta crítica - Nivelación de recursos - Compresión del cronograma

Continuación Cuadro 34

Área de conocimiento	Procesos	Herramientas y técnicas
Costos	<ul style="list-style-type: none"> - Estimación de costos - Determinar presupuesto - Controlar los costos 	<ul style="list-style-type: none"> - Juicio de expertos - Estimación análoga - Estimación abajo-arriba - Software Microsoft Project - Software Microsoft Excel - Suma de costos - Cambios al costo - Gestión del valor Ganado - Proyecciones
Calidad	<ul style="list-style-type: none"> - Plan de gestión de la Calidad - Aseguramiento de la calidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Reuniones - Análisis de procesos
Recursos Humanos	<ul style="list-style-type: none"> - Plan de Recursos Humanos - Desarrollar y gestionar el equipo del proyecto 	<ul style="list-style-type: none"> - Organigramas y descripciones de puestos - Creación de relaciones de trabajo - Habilidades específicas - Observación y conversación
Comunicaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Planificar las comunicaciones - Distribución de la información 	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis de los interesados - Tecnología de las comunicaciones - Métodos de comunicación

Continuación Cuadro 34

Área de conocimiento	Procesos	Herramientas y técnicas
Riesgos	<ul style="list-style-type: none"> - Plan de manejo de riesgos - Identificar los riesgos - Análisis de los riesgos - Plan de respuesta a los riesgos 	<ul style="list-style-type: none"> - Reuniones de planificación y análisis - Revisiones a la documentación - Técnicas de recopilación de información - Análisis de supuestos - Evaluación de probabilidad e impacto de los riesgos - Estrategia de respuesta a riesgos - Juicio de expertos
Adquisiciones	<ul style="list-style-type: none"> - Planificar las adquisiciones - Efectuar las adquisiciones - Documentar las adquisiciones 	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis de hacer o comprar - Búsqueda en internet

2. Plan de gestión del alcance del proyecto

a. **Recolección de requerimientos.** Este proceso permite documentar y analizar cada uno de los requerimientos de los diferentes interesados en el proyecto, así como el análisis detallado de los requerimientos de cada uno de los detectores de partículas. La identificación de requisitos se realizó en conjunto con los interesados en el proyecto, durante las reuniones semanales. Este proceso es de suma importancia porque nos ayudará a validar que todos los requerimientos se hayan cumplido con cabalidad.

Herramientas

En este proceso se utilizan las siguientes técnicas y herramientas para realizar una eficiente toma de requerimientos:

- Entrevistas con cada uno de los miembros del equipo LAGO

- Lluvia de ideas
- Bosquejos de diseño
- Análisis de información histórica del proyecto LAGO
- Toma de decisiones grupal

Salida

- Matriz de trazabilidad, indicando la categoría, el objetivo que cumplen, su método de validación y otros aspectos de cada requerimiento.

b. Desarrollo del alcance. En este proceso se define el alcance del proyecto a partir de los entregables del mismo. Se describen las limitaciones del proyecto. Una vez listados todos los requerimientos, el alcance del proyecto se define, tomando en cuenta lo que se va a entregar por cada módulo específico del proyecto.

Entradas

- Acta de constitución del proyecto
- Documentación de requerimientos

Herramientas

- Juicio técnico de todos los miembros
- Generación de alternativas en las decisiones
- Análisis de los entregables finales

Salidas

- Descripción del alcance del proyecto
- Criterios de aceptación

c. Creación de la estructura de desglose de trabajo (EDT). De acuerdo al alcance del proyecto, crear el desglose del trabajo, y asignar responsables a cada entregable. Descompone jerárquicamente los entregables de cada módulo de trabajo del proyecto.

Entradas

- Matriz de requerimientos

Herramientas

- Descomposición de los trabajos a realizarse
- Juicio técnico

Salidas

- EDT
- Diccionario de la EDT

d. Validación del alcance. Se formaliza la aceptación de los entregables del proyecto que se hayan completado.

Entradas

- Matriz de trazabilidad de requisitos
- Entregables verificados
- Desempeño del trabajo

Herramientas

- Inspecciones
- Toma de decisiones grupales

Salidas

- Entregables aceptados
- Solicitudes de cambio

e. Control del alcance. Se monitorearon los cambios que puedan ocurrir en el alcance y se trabajará para mantener el rumbo del proyecto.

Entradas

- Requerimientos
- Datos de rendimiento

Salidas

- Propuestas de cambio
- Información de rendimiento
- Cambios a documentos

3. Recolección de requerimientos. En este proceso se definen los requerimientos de cada módulo, con su método de validación.

Cuadro 35. Requerimientos identificados para la tercera fase del Megaproyecto LAGO

ID REQ	Requerimiento	Descripción	Categoría	Priori-dad	Validación	Solicitado por
REQ-1	2 tanques funcionales	1 tanque de 600L, con armazón interna de PVC y Tyvek, con un tubo fotomultiplicador instalado en la parte superior.	Funcional	Alta	1 tanque independiente con captura de datos.	Todos
REQ-2	Reflexión y tyvek	Los tanques deben tener una capa interna de tyvek para garantizarla reflexión de las partículas dentro del tanque.	Calidad	Alta	1 tanque con de recubrimiento Tyvek.	Química

Continuación Cuadro 35

ID REQ	Requerimiento	Descripción	Categoría	Prioridad	Validación	Solicitado por
REQ-3	Captura de datos	Utilizando una computadora con Ubuntu 14.02 conectada al sistema de adquisición oficial de LAGO, ANNA y al detector, capturar datos de la electrónica LAGO.	Funcional	Alta	Datos almacenados en computadora.	Computación, Electrónica
REQ-4	Mandar datos a repositorio LAGO	Enviar datos adquiridos por medio de protocolo de copia segura a los servidores del repositorio de la colaboración LAGO, ubicados en Colombia utilizando de la suite oficial de la colaboración, ANNA.	Funcional	Alta	Datos recibidos y almacenados en servidores de Colombia.	Computación, LAGO
REQ-5	Pruebas Raspberry-Pi	Utilizar un controlador RaspBerry-Pi para enviar datos a la colaboración LAGO	Funcional	Baja	Datos recolectados, enviados y recibidos por la colaboración LAGO en Colombia.	Computación

Continuación Cuadro 35

ID REQ	Requerimiento	Descripción	Categoría	Prioridad	Validación	Solicitado por
REQ-6	Algoritmos de IA	Filtrado y clasificación de datos.	Calidad	Media	Filtrado post-adquisición de datos.	Computación
REQ-7	Simulación Geant4	Simulación de adquisición de datos con condiciones usadas en Campus Central UVG.	No funcional	Alta	Simulaciones con datos aproximados a la realidad.	Física
REQ-8	Pre procesamiento de datos ANNA	Utilizar la suite ANNA para la caracterización inicial de los datos.	Funcional	Alta	Acceso a plataforma de LAGO.	Física
REQ-9	Usar la plataforma Sol.cc, incluida en ANNA para análisis de modelo de heliósfera	Analizar el modelo de la heliósfera, tomando en cuenta el conteo de partículas durante una corrida	No funcional	Alta	Análisis de heliósfera exitoso, con relación al fenómeno de Forbush Decreases	Física

Continuación Cuadro 35

ID REQ	Requerimiento	Descripción	Categoría	Prioridad	Validación	Solicitado por
REQ-10	Recirculación de agua	Agitar el agua para evitar su sedimentación.	Calidad	Media	Agua no sedimentada en tanques.	Química
REQ-11	Experimento de vida media del muón	Elaboración de un KIT de aprendizaje virtual con experimentos de Física Moderna.	No funcional	Alta	Herramienta útil para estudiantes de Física Moderna.	Física, Computación
REQ-12	Algoritmo de auto calibración	Calibrar el voltaje utilizado por el fototubo de forma automática.	Funcional	Alta	Auto calibración de voltaje de alimentación a Fototubo.	Electrónica
REQ-13	Fuente conmutada	Fuente que suministra al fotormultiplicador con alto voltaje	Funcional	Alta	Adquisición correcta desde fototubo Hamamatsu	Electrónica
REQ-14	Tarjeta prototípica	Elaboración de tarjeta para tanque 2.	Funcional	Alta	Tarjeta digitalizadora para pruebas con Redpitaya	Electrónica
REQ-15	Diseño de tarjeta hija	Mejoras y diseño planteado para tarjeta compatible con RedPitaya	No funcional	Alta	Validación de diseño de tarjeta.	Electrónica

Continuación Cuadro 35

ID REQ	Requerimiento	Descripción	Categoría	Prioridad	Validación	Solicitado por
REQ-16	Fase 1: Adquisición con RedPitaya	Adquirir en tanque 2, usando Nexys 2 como regulador de voltaje y RedPitaya para adquirir datos.	Transición	Alta	Adquisición en tanque 2 utilizando RedPitaya para adquirir datos.	Electrónica
REQ-17	Fase 2: Calibración con RedPitaya	Calibrar el voltaje y adquiriendo datos con la RedPitaya	Funcional	Alta	Adquirir datos y calibrar voltaje.	Electrónica
REQ-18	Pruebas de conductividad	Medir la conductividad del medio.	No funcional	Alta	Datos de conductividad del agua analizados.	Química
REQ-19	Cloración y coagulante	Clorar el agua para evitar el crecimiento de bacterias en el medio.	Funcional	Media	Agua sin bacterias.	Química
REQ-20	Índice de refracción	Medir el índice de refracción dentro del medio de detección.	No funcional	Alta	Datos de índice de refracción analizados.	Química

4. Definición del alcance. El alcance de la fase del proyecto se define a partir de los entregables de cada módulo. En esta fase se cubre la construcción del detector de radiación Vavilov-Cherenkov, totalmente funcional y con una segunda propuesta de electrónica. El detector se construye dentro del campus central de la Universidad del Valle de Guatemala, utilizando depósito de agua de 600L, tubo fotomultiplicadore y componentes electrónicos variados.

Entregables:

Kinich Ahau

El primer detector, denominado “Kinich Ahau” por los miembros del proyecto, fue construido con el diseño actual de LAGO, que usa procesadores de datos FPGA, específicamente, el modelo Nexys 2 y su respectiva tarjeta de adquisición, con un fotomultiplicador marca Photonis, donado por la colaboración LAGO.

Análisis de datos:

El análisis de los datos obtenidos es parte esencial de esta fase, luego de la construcción de un detector, se puede iniciar con la caracterización de datos obtenidos, creando algoritmos de inteligencia artificial que puedan clasificar las cantidades de energía detectadas en distintas clases, para luego relacionarlas a algún tipo de partícula específica (electrón, o muón). El alcance del proyecto incluye un módulo de análisis químico que pretende estandarizar los parámetros del agua utilizada en los detectores, analizando varios tipos de agua con distintas propiedades y su influencia en la calidad de los datos adquiridos.

Documentación:

Parte del alcance es entregar toda la documentación de construcción de detectores, para que en el futuro, cuando se retome el proyecto, se tenga una clara base sobre la cual trabajar.

El proyecto no incluye el mantenimiento de los detectores ni el seguimiento de las actividades del Proyecto LAGO una vez se cierre esta fase. La validación de los entregables por módulo se define por medio de la funcionalidad de los entregables y por

la aprobación de los interesados, respecto a los informes entregados por el módulo de física y de química.

5. Plan de gestión del tiempo del proyecto

Procesos a utilizar:

a. **Definición de actividades.** Con este proceso se identifican y documentan las acciones y actividades necesarias para lograr generar los entregables del proyecto.

Entradas:

- Alcance del proyecto
- Estructura de trabajo y su diccionario
- Lista de materiales necesarios

Herramientas:

- Descomposición de actividades por módulo (pulverización)
- Planificación gradual
- Entrevistas con miembros LAGO

Salidas:

- Lista de actividades realizadas.
- Atributos y métodos de validación para las actividades.
- Hitos y sus pre-requisitos.

b. Secuenciar actividades

Herramientas:

- Determinación y clasificación de las dependencias.
- Diagramación por precedencias (PDM).
- Definición de retrasos y adelantos y su control.

Salida:

- Diagrama de red de las actividades

c. Estimación de recursos/actividad

Entradas:

- Calendario de recursos
- Registro de riesgos y su relación con los recursos
- Estimación de costos de recursos y actividades

Herramientas:

- Datos publicados (documentación LAGO)
- MS Project

Salidas:

- Requerimiento de recursos por actividad
- Estructura de recursos

d. Estimación de duración de actividades

Entradas:

- EDT

Herramientas:

- Discusiones grupales
- Juicio técnico
- Estimación de tres valores

Salida:

- Tiempos estimados para las actividades

e. Desarrollo de cronograma

Entradas:

- Estructura de desglose de recursos
- Asignaciones de recursos

- Tiempos estimados

Herramientas:

- Método de la ruta crítica
- Método de cadena crítica
- Técnicas de optimización de recursos
- Técnicas de modelado
- Compresión del cronograma
- MS Project

Salida:

- Línea base del cronograma
- Gantt del proyecto
- Diagrama de hitos
- Diagrama de red
- Datos del cronograma
- Calendario del proyecto

f. Control de cronograma

Herramientas:

- Indicadores de desempeño del cronograma

6. Definición de actividades. Se definieron las actividades por paquete de trabajo, junto a los responsables y el equipo necesario para lograr la actividad. En este caso, los responsables trabajan directamente como recurso humano para las actividades, por ser los encargados específicos de cada módulo del Megaproyecto.

Cuadro 36. Identificación de actividades del módulo de parametrización de control de calidad del agua

Id actividad	Actividad	Responsable	Equipo	Material
1.2.1.1	Pruebas con agua con distintas concentraciones	Karen Guarcax	Cajas, Láser	Agua, Cloro
1.2.1.2	Gráficas de mediciones	Karen Guarcax	-	-
1.2.1.3	Interpretación y conclusiones	Karen Guarcax	-	-
1.2.2.1	Lecturas de Radiación Cherenkov.	Karen Guarcax	-	-
1.2.2.2	Definición de parámetros críticos para el control de las mediciones.	Karen Guarcax	-	-
1.2.3.1	Diseño de circulación de agua en tanque	Karen Guarcax, Luis Pinillos	-	-
1.2.3.2	Instalación de diseño en tanque 2	Karen Guarcax, Luis Pinillos, Luis Mijangos, Gabriel Solomon		-
1.2.4.1	Medición de conductividad en aguas con distintas propiedades.	Karen Guarcax	Cajas, Láser	Agua, Cloro

Continuación Cuadro 36.

Id actividad	Actividad	Responsable	Equipo	Material
1.2.4.2	Análisis de impacto de conductividad en mediciones.	Karen Guarcax	-	-
1.2.5.1	Medición de largo de atenuación en aguas con distintas propiedades.	Karen Guarcax	Cajas, Láser	Agua, Cloro
1.2.5.1	Análisis de impacto del largo de atenuación en mediciones.	Karen Guarcax		-

Cuadro 37. Identificación de actividades del módulo de Transferencia, almacenamiento y caracterización de datos

Id actividad	Actividad	Responsable	Equipo	Material
1.3.1.1	Acceso a base de datos LAGO	Miguel Novella	Raspberry Pi, PC, FPGA	-
1.3.1.2	Envío de datos a repositorio	Miguel Novella	Raspberry Pi, PC, FPGA	-
1.3.2.1	Envío de datos a repositorio desde Raspberry Pi	Miguel Novella	Raspberry Pi, FPGA	-

Continuación Cuadro 37.

Id actividad	Actividad	Responsable	Equipo	Material
1.3.3.1	Obtención de señal y de datos desde detector	Miguel Novella, Daniel Conde		
1.3.3.2	Relación de datos y cantidades de energía por partícula	Miguel Novella, Daniel Conde		
1.3.3.3	Caracterización de datos para siguientes corridas.	Miguel Novella, Daniel Conde		
1.3.4.1	Almacenamiento de datos recientes	Miguel Novella	Raspberry Pi, PC, FPGA	-
1.3.4.2	Separación de datos, base de datos	Miguel Novella	PC	-
1.3.5.1	Creación de algoritmos basados en caracterización de datos	Miguel Novella		-
1.3.6.1	Recolección de datos con programa de RedPitaya	Miguel Novella	Raspberry Pi, PC, Red Pitaya	-
1.3.6.2	Envío de datos a repositorio desde Detector 2	Miguel Novella	Raspberry Pi, PC, Red Pitaya	-

Cuadro 38. Identificación de actividades del módulo de Análisis de partículas

Id actividad	Actividad	Responsable	Equipo	Material
1.4.1.1	Análisis de gráficas	Daniel Conde	-	-
1.4.1.2	Relación de cantidades de energía	Daniel Conde	-	-
1.4.2.1	Instalación y uso de Geant4	Daniel Conde, Miguel Novella	Geant 4	-
1.4.2.2	Modelado de condiciones de detectores en Geant4	Daniel Conde	Geant 4	-
1.4.2.3	Simulaciones	Daniel Conde	Geant 4	-
1.4.2.4	Análisis de datos, comparaciones	Daniel Conde	-	-
1.4.3.1	Obtención de datos simultáneos en detectores	Daniel Conde, Miguel Novella, Pablo Duque, Luis Pinillos	PC, Raspberry Pi, FPGA, Red Pitaya	-
1.4.3.2	Análisis de partículas incidentes	Daniel Conde	-	-
1.4.3.3	Análisis de relación de eventos detectados	Daniel Conde	-	-

Continuación Cuadro 38.

Id actividad	Actividad	Responsable	Equipo	Material
1.4.4.1	Análisis de partículas detectadas en Latinoamérica	Daniel Conde	-	-
1.4.4.2	Relación de eventos regionales	Daniel Conde	-	-
1.4.5.1	Diseño de experimentos basados en datos recolectados	Daniel Conde	-	-

Cuadro 39. Identificación de actividades del módulo de Diseño y construcción de tanques

Id actividad	Actividad	Responsable	Equipo	Material
1.5.1.1	Diseño de armazón en inventor	Luis Pinillos	-	
1.5.1.2	Diseño de sistema de recirculación de agua.	Luis Pinillos, Karen Guarcax	-	
1.5.2.1	Corte y ajuste de tubos T1	Luis Pinillos, Gabriel Solomon	Tanque 1	Tubos, codos
1.5.2.2	Estructura de tyvek T1	Karen Guarcax	Tanque 1	Tyvek, hilo

Continuación Cuadro 39.

Id actividad	Actividad	Responsable	Equipo	Material
1.5.2.3	Aislamiento lumínico T1	Gabriel Solomon	Tanque 1	Aislante lumínico
1.5.2.4	Posicionamiento de fototubo en estructura T1	Luis Pinillos	Tanque 1, Fototubo 1	Pegamento negro, cubetas
1.5.2.5	Cableado T1	Luis Pinillos, Pablo Duque	Tanque 1, RG58, Ethernet, SMA-M, RJ45, Crimpeadora	
1.5.3.1	Realización de caera de ensamble	Gabriel Solomon	-	
1.5.3.2	Corte y ajuste de tubos T2	Luis Pinillos, Gabriel Solomon	Tanque 2	Tubos, codos
1.5.3.3	Estructura de tyvek T2	Karen Guarcax	Tanque 2	Tyvek, hilo
1.5.3.4	Aislamiento lumínico T2	Gabriel Solomon	Tanque 2	Aislante lumínico

Cuadro 40. Identificación de actividades del módulo de Electrónica

Id actividad	Actividad	Responsable	Equipo	Material
1.6.1.1	Diseño y manufactura de placas			
1.6.1.1.1	Diseño de placa de adquisición para Red Pitaya	Pablo Duque	Red Pitaya	
1.6.1.1.2	Manufactura de tarjeta hija prototípica	Pablo Duque	Red Pitaya	Componentes de placa de adquisicion
1.6.1.2.1	Intercambio de Red Pitaya con Nexys 2	Luis Pinillos	Red Pitaya, Placa Red Pitaya	
1.6.1.2.2	Adquisición de datos con RedPitaya	Luis Pinillos, Pablo Duque, Miguel Novella	Red Pitaya, Placa Red Pitaya	
1.6.1.2.3	Integración de auto calibración en Tanque 2	Luis Pinillos	Red Pitaya, Placa Red Pitaya	
1.6.1.3.1	Determinar tiempo de respuesta óptimo	Luis Pinillos	Red Pitaya, Placa Red Pitaya	

Continuación Cuadro 40.

Id actividad	Actividad	Responsable	Equipo	Material
1.6.1.3.2	Implementar algoritmo de auto calibración en Red Pitaya	Luis Pinillos	Red Pitaya, Placa Red Pitaya	
1.6.2.1.1	Conexión de tarjeta de adquisición LAGO a FPGA	Luis Pinillos, Pablo Duque	FPGA, Placa FPGA	
1.6.2.1.2	Conexión de tarjeta de adquisición LAGO al fotomultiplicador	Luis Pinillos, Pablo Duque	FPGA, Placa FPGA	

7. Secuenciación de actividades. Se presentan los diagramas de red por módulo de trabajo, demostrando de forma gráfica las precedencias de las actividades. El diagrama de red completo se muestra en el Anexo.

Figura 113. Diagrama de red para módulo de transferencia, almacenamiento y caracterización de datos

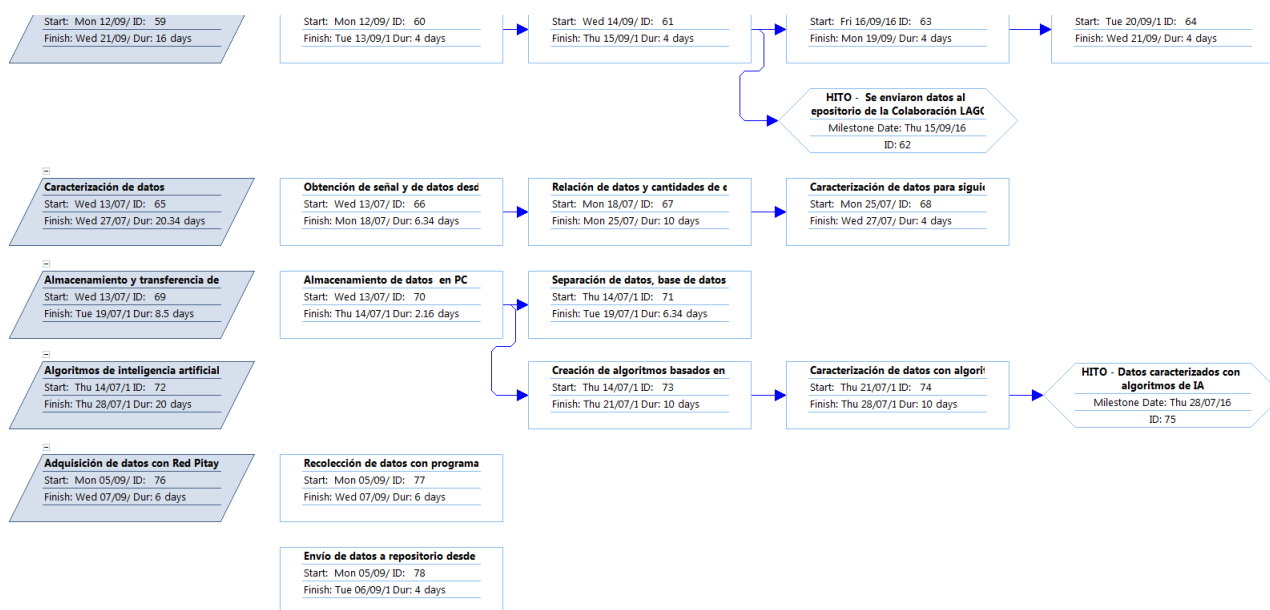


Figura 114. Diagrama de red para módulo de Diseño y construcción de tanques

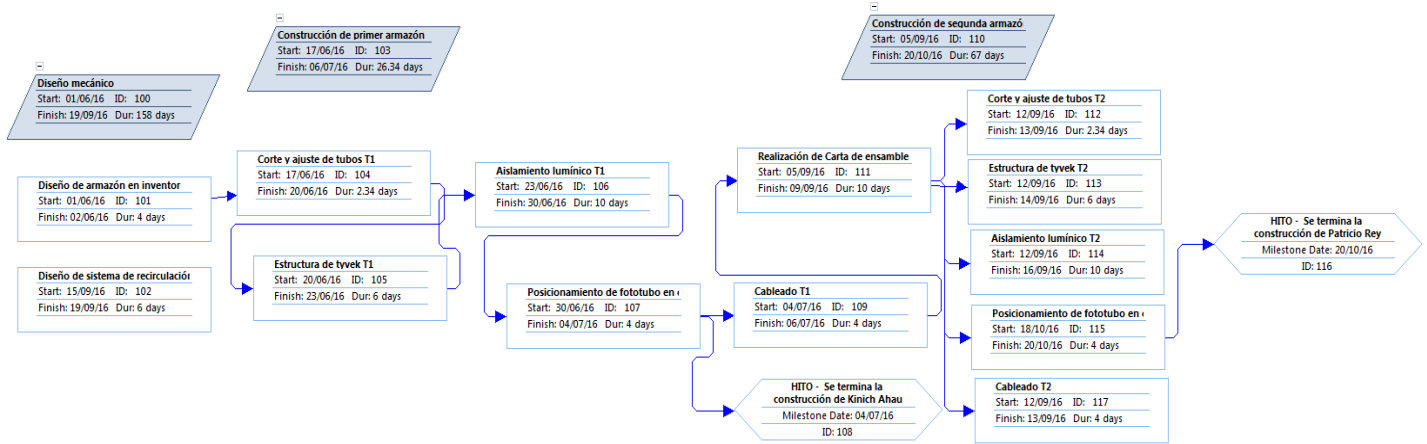
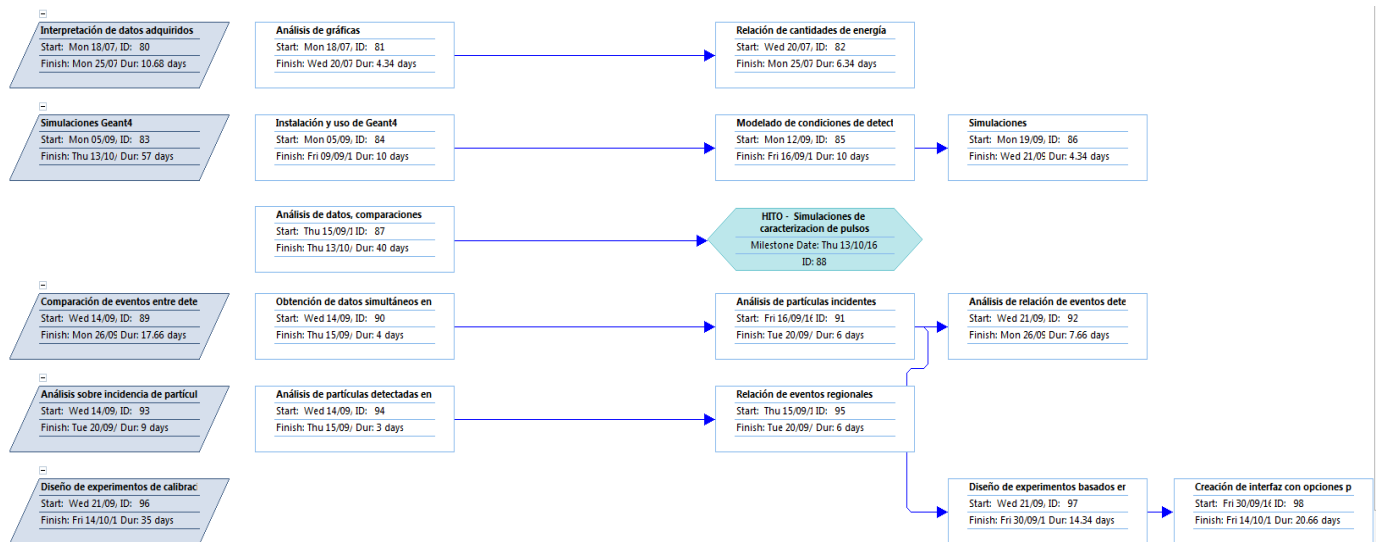


Figura 115. Diagrama de red para módulo de Análisis de partículas



8. Estimación de duraciones de actividades. Tomando en cuenta la incertidumbre y el riesgo que tienen las actividades, por su naturaleza de ser la primera vez que se implementa un proyecto de este tipo en la Universidad, se utiliza el método de estimación por tres valores, con la distribución clásica PERT, evaluando 3 posibilidades de tiempos para cada actividad.

Cuadro 41. Estimación de tiempos para actividades de parametrización de control de calidad del agua

Id actividad	Pesimista	Más Probable	Optimista	Duración de actividad	Medición
1.2.1	35	23	14	23.5	días
1.2.1.1	20	15	10	15	días
1.2.1.2	5	3	1	3	días
1.2.1.3	10	5	3	5.5	días
1.2.2	20	13	6	13	días
1.2.2.1	15	10	5	10	días
1.2.2.2	5	3	1	3	días
1.2.3	15	8	4	8.5	días
1.2.3.1	10	5	3	5.5	días
1.2.3.2	5	3	1	3	días
1.2.4	28	20	13	20.16666667	días
1.2.4.1	20	15	10	15	días
1.2.4.2	8	5	3	5.166666667	días
1.2.5	45	30	20	30.83333333	días
1.2.5.1	30	20	15	20.83333333	días
1.2.5.1	15	10	5	10	días

Cuadro 42. Estimación de tiempos para actividades de transferencia, almacenamiento y caracterización de datos

Id actividad	Pesimista	Más Probable	Optimista	Duración de actividad	Medición
1.3.1	12	8	4	8 días	
1.3.1.1	3	2	1	2 días	
1.3.1.2	3	2	1	2 días	
1.3.2	3	2	1	2 días	
1.3.2.1	3	2	1	2 días	
1.3.3	10	7	4	7 días	
1.3.3.1	5	3	2	3.17 días	
1.3.3.2	7	5	3	5 días	
1.3.3.3	3	2	1	2 días	
1.3.4	7	4	2.5	4.25 días	
1.3.4.1	2	1	0.5	1.08 días	
1.3.4.2	5	3	2	3.17 días	
1.3.5	7	5	3	5 días	
1.3.5.1	7	5	3	5 días	
1.3.6	8	5	2	5 días	
1.3.6.1	5	3	1	3 días	
1.3.6.2	3	2	1	2 días	

Cuadro 43. Estimación de tiempos para actividades de análisis de partículas

Id actividad	Pesimista	Más Probable	Optimista	Duración de actividad	Medición
1.4.1	9	5	3	5.33	días
1.4.1.1	4	2	1	2.17	días
1.4.1.2	5	3	2	3.17	días
1.4.2	30	22	14	22	días
1.4.2.1	7	5	3	5	días
1.4.2.2	7	5	3	5	días
1.4.2.3	4	2	1	2.17	días
1.4.2.4	12	10	7	9.83	días
1.4.3	13	9	4	8.83	días
1.4.3.1	3	2	1	2	días
1.4.3.2	5	3	1	3	días
1.4.3.3	5	4	2	3.83	días
1.4.4	20	14	10	14.3	días
1.4.4.1	10	7	5	7.17	días
1.4.4.2	10	7	5	7.17	días
1.4.5	25	17	12	17.5	días
1.4.5.1	10	7	5	7.17	días
1.4.5.2	15	10	7	10.33	días

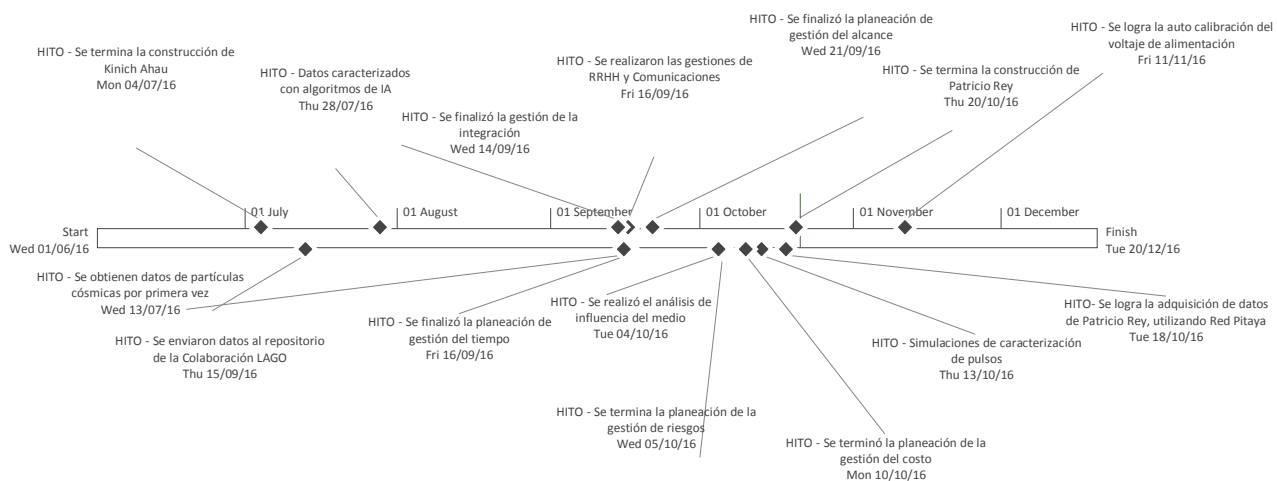
Cuadro 44. Estimación de tiempos para actividades de diseño y construcción de tanques

Id actividad	Pesimista	Más probable	Optimista	Duración de actividad	Medición
1.5.1	8	5	3	5.17	días
1.5.1.1	3	2	1	2	días
1.5.1.2	5	3	2	3.17	días
1.5.2	19	13	8	13.17	días
1.5.2.1	2	1	1	1.17	días
1.5.2.2	4	3	2	3	días
1.5.2.3	7	5	3	5	días
1.5.2.4	3	2	1	2	días
1.5.2.5	3	2	1	2	días
1.5.3	26	18	11	18.17	días
1.5.3.1	7	5	3	5	días
1.5.3.2	2	1	1	1.17	días
1.5.3.3	4	3	2	3	días
1.5.3.4	7	5	3	5	días
1.5.3.5	3	2	1	2	días
1.5.3.6	3	2	1	2	días

Cuadro 45. Estimación de tiempos para actividades de electrónica

Id actividad	Pesimista	Más probable	Optimista	Duración de actividad	Medición
1.6.1.1	27	19	13	19.33	días
1.6.1.1.1	12	9	6	9	días
1.6.1.1.2	15	10	7	10.333	días
1.6.1.2	24	17	11	17.17	días
1.6.1.2.1	7	5	3	5	días
1.6.1.2.2	7	5	3	5	días
1.6.1.2.3	10	7	5	7	días
1.6.1.3	17	12	8	12.17	días
1.6.1.3.1	7	5	3	5	días
1.6.1.3.2	10	7	5	7.17	días
1.6.2.2	15	10	5	10	días
1.6.2.2.1	15	10	5	10	días

9. Desarrollo de cronograma. Con la información de estimación de tiempos y las precedencias de las actividades, se generó un cronograma comprendido de 289 días. El cronograma completo se incluye en el Anexo.

Figura 116. Diagrama de hitos, basado en el cronograma del Proyecto.

10. Estimación de costos. Se realizó una estimación de costos relacionados a la adquisición de equipo o material, por actividad, de abajo a arriba. Nótese que en las actividades de análisis físico, químico y computacional no se incurre en costos, ya que ya se cuenta con el material necesario para estas actividades.

Cuadro 46. Estimación de costos, de abajo a arriba

Id actividad	Equipo	Material	Costo real asociado
1.2.1.1	Cajas, láser	Agua, Cloro	Q0.00
1.2.1.2	-	-	Q0.00
1.2.1.3	-	-	Q0.00
1.2.2.1	-	-	Q0.00
1.2.2.2	-	-	Q0.00
1.2.3.1	-	-	Q0.00
1.2.3.2	Bomba	-	Q300.00
1.2.4.1	Cajas, Láser	Agua, Cloro	Q0.00
1.2.4.2	-	-	Q0.00
1.2.5.1	Cajas, Láser	Agua, Cloro	Q0.00
1.2.5.1	-	-	Q0.00

Continuación Cuadro 46.

Id actividad	Equipo	Material	Costo real asociado
1.3.1.1	Raspberry Pi, PC, FPGA	-	Q0.00
1.3.1.2	Raspberry Pi, PC, FPGA	-	Q0.00
1.3.2.1	Raspberry Pi, FPGA	-	Q0.00
1.3.3.1	-	-	Q0.00
1.3.3.2	-	-	Q0.00
1.3.3.3	-	-	Q0.00
1.3.4.1	Raspberry Pi, PC, FPGA	-	Q0.00
1.3.4.2	PC	-	Q0.00
1.3.5.1	-	-	Q0.00
1.3.6.1	Raspberry Pi, PC, Red Pitaya	-	Q0.00
1.3.6.2	Raspberry Pi, PC, Red Pitaya	-	Q0.00
1.4.1.1	-	-	Q0.00
1.4.1.2	-	-	Q0.00
1.4.2.1	Geant 4	-	Q0.00
1.4.2.2	Geant 4	-	Q0.00
1.4.2.3	Geant 4	-	Q0.00
1.4.2.4	-	-	Q0.00
1.4.3.1	PC, Raspberry Pi, FPGA, Red Pitaya	-	Q0.00
1.4.3.2	-	-	Q0.00
1.4.3.3	-	-	Q0.00
1.4.4.1	-	-	Q0.00
1.4.4.2	-	-	Q0.00
1.4.5.1	-	-	Q0.00
1.4.5.2	-	-	Q0.00
1.5.1.1	-	-	Q0.00
1.5.1.2	-	-	Q0.00
1.5.2.1	Tanque 1	Tubos, Codos	Q0.00
1.5.2.2	Tanque 1	Tyvek, Hilo	Q0.00

Continuación Cuadro 46.

Id actividad	Equipo	Material	Costo real asociado
1.5.2.3	Tanque 1	Aislante lumínico	Q300.00
1.5.2.4	Tanque 1, Fototubo 1	Pegamento negro, Cubetas	Q20,150.00
1.5.2.5	Tanque 1, RG58, Ethernet, SMA-M, RJ45, Crimpeadora		Q300.00
1.5.3.1	-	-	
1.5.3.2	Tanque 2	Tubos, Codos	Q800.00
1.5.3.3	Tanque 2	Tyvek, Hilo	Q150.00
1.5.3.4	Tanque 2	Aislante lumínico	Q300.00
1.5.3.5	Tanque 2, Fototubo 2	Pegamento negro, Cubetas	Q20,150.00
1.5.3.6	Tanque 2, RG58, Ethernet, SMA-M, RJ45, Crimpeadora		Q300.00
1.6.1.1.1	Red Pitaya	-	Q2,400.00
1.6.1.1.2	Red Pitaya	Componentes placa	Q700.00
1.6.1.2.1	Red Pitaya, Placa Red Pitaya		Q0.00
1.6.1.2.2	Red Pitaya, Placa Red Pitaya		Q0.00
1.6.1.2.3	Red Pitaya, Placa Red Pitaya		Q0.00
1.6.1.3.1	Red Pitaya, Placa Red Pitaya	-	Q0.00
1.6.1.3.2	Red Pitaya, Placa Red Pitaya	-	Q0.00
1.6.2.1.1	Fototubo 1, FPGA, Placa Fototubo 1	-	Q0.00
1.6.2.1.2	Fototubo 1, FPGA, Placa Fototubo 1	-	Q0.00
1.6.2.2.1	FPGA	-	Q0.00

Se define una reserva de contingencia del 10% del total del costo estimado de las actividades, Q.45,850, totalizando un costo estimado de Q. 50,405.

11. Elaboración de presupuesto. Con base en costo estimado y la reserva de contingencia calculada para controlar los riesgos del proyecto, se definió la siguiente línea base de costos, tomando una reserva para costos de actividades equivalente al 10% del costo estimado de actividades. El presupuesto calculado para esta fase del proyecto es Q. 57,600

Figura 117. Línea base de costos para la tercera fase del megaproyecto lago

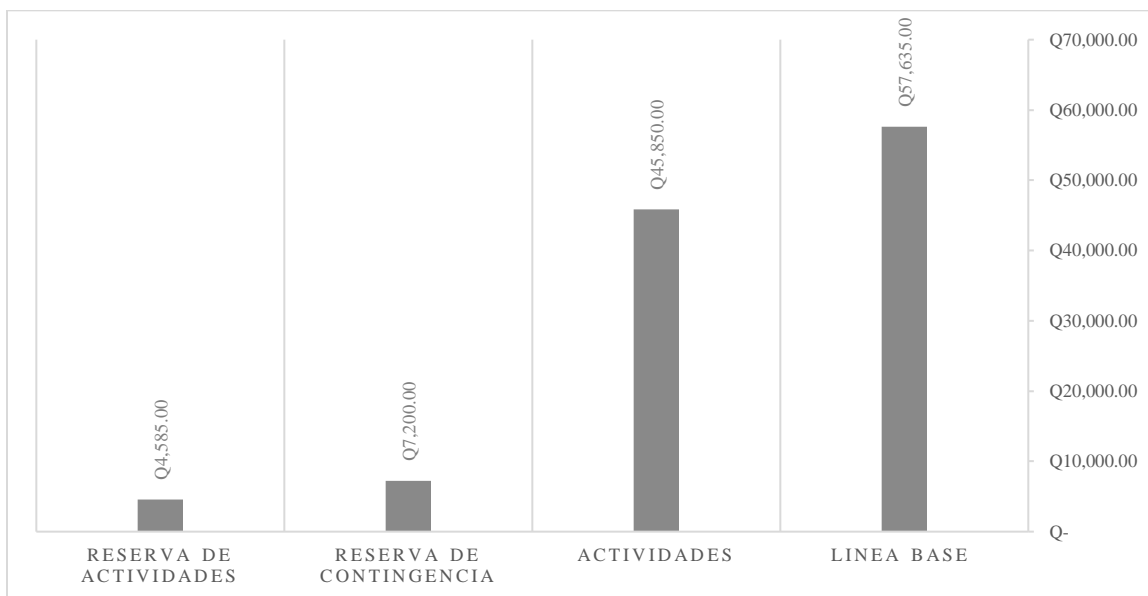
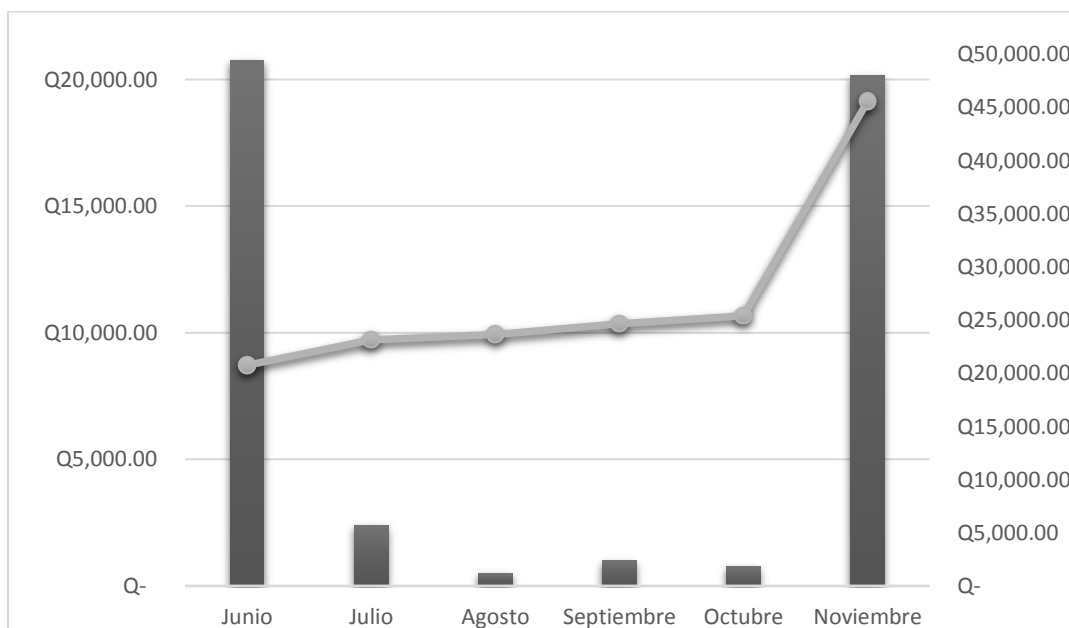


Figura 118. Costos por periodo, en quetzales

12. Plan de gestión de la calidad. La calidad de los entregables es definida por los interesados en el proyecto, esta es monitoreada a lo largo de la ejecución del proyecto por los miembros del equipo LAGO UVG.

Proceso a utilizar:

a. Aseguramiento de la calidad

Entradas:

- Documentos del proyecto
- EDT
- Matriz de requerimientos
- Medidas de control de calidad

Herramientas:

- Análisis de procesos
- Reuniones semanales

Salidas:

- Solicitudes de cambio
- Actualizaciones a los documentos del proyecto

13. Plan de gestión de los riesgos del proyecto

Procesos a utilizar:

a. Identificación de riesgos

Entradas:

- Línea base del alcance
- Estimación de costos de las actividades
- Estimación de la duración de las actividades
- Registro de interesados
- Documentos del proyecto
- Documentos de las adquisiciones

Herramientas:

- Revisiones a la documentación
- Técnicas de recopilación de información
- Plataforma RiskGap
- Juicio de expertos

Salidas:

- Registro de riesgos

b. Análisis cualitativo de riesgos

Entradas:

- Registro de riesgos

Herramientas:

- Evaluación de la probabilidad e impacto de los riesgos
- Matriz de probabilidad de impacto
- Juicio de expertos

Salidas:

- Actualización a los documentos del proyecto

c. Análisis cuantitativo de riesgos

Entradas:

- Registro de riesgos
- Costos estimados

Herramientas:

- Técnicas de análisis cuantitativo de riesgos y de modelado.
- Juicio de expertos

Salidas:

- Actualización a los documentos del proyecto

d. Planes de respuesta a riesgos

Entradas:

- Registro de riesgos

Herramientas:

- Estrategias para riesgos negativos o amenazas
- Estrategias de respuesta a contingencias
- Juicio de expertos

Salidas:

- Actualizaciones a los documentos del proyecto

14. Identificación de riesgos. Se identificaron los siguientes riesgos para la fase de construcción de detectores y análisis del fenómeno. En este caso, se consideran todos los riesgos identificados para asignarles una respuesta planificada.

Cuadro 47. Identificación y descripción de riesgos

ID Riesgo	Riesgo	Descripción
RID-01	Riesgo de cumplimiento de análisis químico y físico	Debido a que el análisis químico y físico de las mediciones depende totalmente de la puesta en marcha de ambos detectores, existe el riesgo del atraso de estos módulos del proyecto, impactando la interpretación correcta y el envío a tiempo de los datos recolectados.
RID-02	Riesgo de proveedores	Debido a que se tienen proveedores locales e internacionales, existe el riesgo de incumplimiento y falsos tiempos, así como de atrasos en entregas, con el impacto de retrasar el proyecto.
RID-03	Riesgo por humedad en electrónica	Debido a la proximidad física entre la electrónica y el depósito de agua, existe el riesgo de desgaste de los componentes electrónicos, con impacto directo en la funcionalidad de los detectores.
RID-04	Riesgo de Hardware y Software	Debido a posibles problemas de compatibilidad entre el software de las computadoras de la UVG y el hardware a utilizar en los detectores, existe el riesgo de tener que adquirir equipo nuevo compatible con el impacto en el tiempo y costo del proyecto.

Continuación Cuadro 47.

ID Riesgo	Riesgo	Descripción
RID-05	Riesgo de validaciones con colaboración LAGO	Debido al desarrollo de la nueva electrónica actualizada, en conjunto con la colaboración, el riesgo de complicaciones en validaciones puede impactar al proyecto en su tiempo de ejecución.
RID-06	Riesgo por falta de financiamiento inmediato	Debido a que existe la posibilidad de incurrir en costos locales imprevistos, existe el riesgo que, por falta de recursos financieros inmediatos, se impacte el tiempo de ejecución del proyecto.
RID-07	Riesgo relacionado a la manufactura de placas electrónicas	Debido a la naturaleza de los componentes electrónicos a usarse, existe la posibilidad de que estos fallen y se impacte negativamente al proyecto en los aspectos de costo y tiempo.
RID-08	Riesgo por falta de espacio de almacenamiento de datos	Debido a la alta cantidad de datos a obtener para analizar, existe el riesgo que se necesite espacio extra de almacenamiento, con el impacto en tener que obtener más espacio de almacenamiento digital.

15. Análisis cualitativo de riesgos. Utilizando la herramienta RiskGap, se realizó un análisis de riesgos, se encontró que el riesgo cuya ponderación tiene mayor efecto en el proyecto es el riesgo de cumplimiento de análisis físico y químico, por la alta probabilidad de ocurrir debido a la dependencia que tiene del resto de actividades. A los riesgos con ponderación actual se les asigna un plan de respuesta para poder reducir ese impacto.

Cuadro 48. Análisis cualitativo y ponderación de riesgos antes de la aplicación de los planes de respuesta.

ID riesgo	Impacto	Probabilidad	Ponderación
RID-01	7	8	56
RID-02	6	5	30
RID-03	8	7	56
RID-04	8	5	40
RID-05	5	5	25
RID-06	5	6	30
RID-07	6	5	30
RID-08	4	3	12

16. Planes de respuesta a riesgos. Se desarrolló un plan de respuesta para cada riesgo, algunos riesgos se clasificaron como mitigables, y otros como evitables.

Cuadro 49. Planes de respuesta por riesgo.

ID Riesgo	Estrategia de riesgo	Plan de respuesta
RID-01	Evitar	Dar inicio a las actividades de análisis con datos del primer tanque, trabajando en simultáneo con la construcción del segundo detector.
RID-02	Mitigar	Hacer las órdenes de compra internacionales por lo menos 2 semanas antes de la necesidad del material.
RID-03	Mitigar	Uso de material absorbente, de forma temporal (arroz). Compra de silica gel para absorber la humedad.
RID-04	Evitar	Asegurar la instalación del sistema operativo en el laboratorio de trabajo. Instalar el sistema operativo en una de las computadoras personales del equipo.

Continuación **Cuadro 49.**

ID Riesgo	Estrategia de riesgo	Plan de respuesta
RID-05	Evitar	Evitar el riesgo teniendo comunicación constante con el equipo LAGO, reportando avances sobre la nueva electrónica.
RID-06	Mitigar	Mitigar por medio de la obtención de fondos con ventas de comida en el Campus Central. Aportes monetarios por parte del equipo lago durante 3 meses.
RID-07	Mitigar	Mitigar comprando materiales extra, añadiéndolos al costo estimado de las actividades.
RID-08	Evitar	Creación de algoritmos eficientes que obtienen datos menos pesados. Almacenamiento en tarjetas SD y memorias USB.

Luego de aplicar los planes de respuesta a cada riesgo, se obtuvo el siguiente análisis con ponderaciones menores para cada riesgo, reduciendo el nivel de riesgo total del proyecto.

Cuadro 50. Análisis cualitativo y ponderación de riesgos después de aplicar los planes de respuesta

ID riesgo	Impacto	Probabilidad	Ponderación
RID-01	7	5	35
RID-02	6	4	24
RID-03	8	3	24
RID-04	8	3	24
RID-05	5	4	20
RID-06	5	4	20
RID-07	6	3	18
RID-08	4	1	4

Luego de aplicar los planes de respuesta a cada riesgo, se obtuvo el siguiente cuadro con los costos que significa cada riesgo re calculados para las nuevas probabilidades de ocurrencia. La reserva de contingencia a usarse es la suma de estos impactos, un total de Q.7,200.

Cuadro 51. Análisis cuantitativo de riesgos después de la aplicación de planes de respuesta

ID riesgo	Impacto en GTQ	Probabilidad	Impacto ponderado
RID-01	GTQ -	50%	GTQ -
RID-02	GTQ 385.00	40%	GTQ 154.00
RID-03	GTQ 19,250.00	30%	GTQ 5,775.00
RID-04	GTQ 2,310.00	30%	GTQ 693.00
RID-05	GTQ -	40%	GTQ -
RID-06	GTQ 770.00	40%	GTQ 308.00
RID-07	GTQ 770.00	30%	GTQ 231.00
RID-08	GTQ 231.00	10%	GTQ 23.10

C. Ejecución

1. Aseguramiento de la calidad. Durante la ejecución, se realizaron dos reuniones cada semana, para discutir el estatus de cada entregable y los siguientes pasos a tomar, en cada módulo. La calidad esperada de los entregables se discutió y manejó constantemente, revisando que los entregables cumplieran con los requerimientos.

2. Realización de adquisiciones. Los materiales necesarios para la construcción de los detectores fueron adquiridos utilizando tanto fondos proporcionados por la Universidad como con fondos recolectados por el equipo LAGO UVG. El proceso para cada adquisición incluye la cotización con 3 distintos proveedores (si los hay) y la decisión de compra se hace tomando en cuenta los factores de precio y tiempo de entrega.

Las compras se realizaron de acuerdo a la siguiente tabla, que detalla el momento de la adquisición y el proveedor con el que se realizó la adquisición.

Cuadro 52. Detalle de adquisiciones de materiales para la construcción de detectores

Material	Proveedor	Procedencia	Necesidad de adquisición
Tanque 600L	Abastecedora de Color	Guatemala	Septiembre, semana 1
3 metros cuadrados de tyvek	Amazon	Estados Unidos	Septiembre, semana 2
Tubos y uniones para armazón	Novex	Guatemala	Septiembre, semana 2
Fototubo Photonis X-1802	Colaboración LAGO	Argentina	Junio, semana 3
Fototubo Hamamatsu R5912-20	Hamamatsu	China	Julio, semana 4
Red Pitaya	Red Pitaya	Estados unidos	Julio, semana 4
40 metros de cable RG58	Cocodrilo Cables y Accesorios	Guatemala	Junio, semana 3
25 metros de cable Ethernet	Cocodrilo Cables y Accesorios	Guatemala	Junio, semana 3
Terminales SMA-M	Steren	Guatemala	Junio, semana 3
Conectores RJ45	Cocodrilo Cables y Accesorios	Guatemala	Junio, semana 3
Silica gel	Amazon	Estados unidos	Octubre, semana 2
Cinta de aislar	Novex	Guatemala	Julio, semana 1
Pegamento sellador negro	Cemaco	Guatemala	Julio, semana 1
Componentes placa de adquisición de Patricio Rey	Digi Key	Estados Unidos	Octubre, semana 4

D. Control y monitoreo

1. Plan de control de cambios. Acercamiento del control de cambios: El manejo de los cambios para la implementación del Proyecto LAGO en la UVG busca que las decisiones que se tomen durante la fase de implementación, ya sea para corregir algún aspecto o para controlar un riesgo, sean aprobados por las personas apropiadas. Los cambios se revisarán en el momento que surjan, de forma inmediata. Se definen los tipos de cambios, la junta directiva encargada de validar cambios y el proceso de validación.

Cuadro 53. Definiciones de tipos de cambio dentro del proyecto

<p><u>Cambios en el cronograma:</u> un cambio en la gestión del tiempo debe significar más de 1 semana de atraso, se puede referir a problemas con proveedores o adquisición de distintos elementos para la construcción.</p>
<p><u>Cambios en el presupuesto:</u> la junta de control de cambios revisará variaciones en el presupuesto cuando éste cambie por cantidades iguales o mayores a Q.1000.</p>
<p><u>Cambios en el alcance:</u> al agregar objetivo o nuevas funcionalidades a los detectores, se harán cambios en el alcance.</p>
<p><u>Cambios a documentos de gestión de proyectos:</u> los documentos de gestión de proyectos se actualizarán conforme se desarrolla el proyecto, todo debe ser documentado.</p>

Cuadro 54. Junta de control de cambios

Nombre	Rol	Responsabilidad	Autoridad
Luis Mijangos	Asesor del proyecto	Aprobación de cambios	Alta
Zaida Urrutia	Patrocinadora	Revisión de cambios	Alta
Horacio Arnaldi	Asesor de LAGO	Aprobación de cambios	Media
Gabriel Solomon	Administrador del proyecto	Implementación y seguimiento de cambios	Media
Luis Pinillos	Diseño del tanque y su electrónica	Determinar cambio	Media
Pablo Duque	Electrónica	Determinar cambio	Media
Karen Guarcax	Análisis químico	Determinar cambio	Media
Miguel Novella	Transferencia y almacenamiento de data	Determinar cambio	Media
Daniel Conde	Análisis físico	Determinar cambio	Media

Cuadro 55. Proceso de control de cambios

Propuesta de cambio	Al encontrarse un aspecto que deba cambiarse, se notificará tanto al administrador como al asesor del proyecto. La solicitud se tomará en cuenta siempre que se realice durante las reuniones o entre semana.
Planificación del cambio	Se hablarán las alternativas y los impactos de los cambios entre el que propone el cambio y el asesor y el administrador.
Validación del cambio	Se comunicarán los cambios propuestos al patrocinador y al asesor LAGO, para validar el cambio.
Revisión del cambio	Se deben controlar los cambios implementados, por parte de todo el equipo de trabajo.

2. Registro de cambios. Durante la ejecución del proyecto surgieron dos cambios significativos. Estos cambios fueron aprobados por todos los miembros del equipo ya que no eran parte del alcance inicial del proyecto y tampoco influye en el costo final del proyecto. No se propusieron cambios adicionales.

Cuadro 56. Cambios propuestos y aprobados.

Cambio	Impacto en costo	Impacto en tiempo	Impacto en alcance
Cancelación de requerimiento 10, circulación de agua	-Q.300 de costo de la bomba a utilizar	16 días en tiempo del cronograma	No se impacta al alcance de forma directa
Cancelación de requerimiento 11, suite interactiva para estudiantes de la UVG	No se tiene impacto en el costo	20 días en tiempo del cronograma	No se impacta al alcance de forma directa

3. Control del tiempo. Se utilizó la metodología del EMV para controlar el desempeño del proyecto respecto al cronograma propuesto y los avances reales logrados. Los indicadores de variación del cronograma e índice de desempeño del cronograma fueron utilizados.

A continuación, la tabla de control utilizada para el control del cronograma.

Cuadro 57. Datos a utilizar para el control del tiempo

Fecha	Valor planeado	Valor ganado
31 de junio	Q20,750.00	Q19,800.00
31 de julio	Q2,400.00	Q2,400.00
31 de agosto	Q1,000.00	Q2,450.00
31 de septiembre	Q800.00	Q750.00
24 de octubre	Q750.00	Q500.00

4. Control de los costos. Se utilizó la metodología del EMV para controlar el desempeño del proyecto respecto a la estimación de costos realizada y los costos incurridos a lo largo del proyecto. Los indicadores de variación del presupuesto e índice de desempeño del costo fueron utilizados. A continuación, la tabla de control utilizada para el control del costo del proyecto.

Cuadro 58. Datos a utilizar para el control del costo

Fecha	Valor ganado	Costo real
31 de junio	Q19,800.00	Q22,000.00
31 de julio	Q2,400.00	Q2,400.00
31 de agosto	Q2,450.00	Q1,650.00
31 de septiembre	Q750.00	Q850.00
24 de octubre	Q500.00	Q1,450.00

XV. MÓDULO DE ADQUISICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL PMT

A. Adquisición con Red Pitaya:

Figura 119. Gráfica mostrando la ecuación que representa la relación entre valores digitales y valor de alto voltaje entregado al PMT utilizando el Canal2.

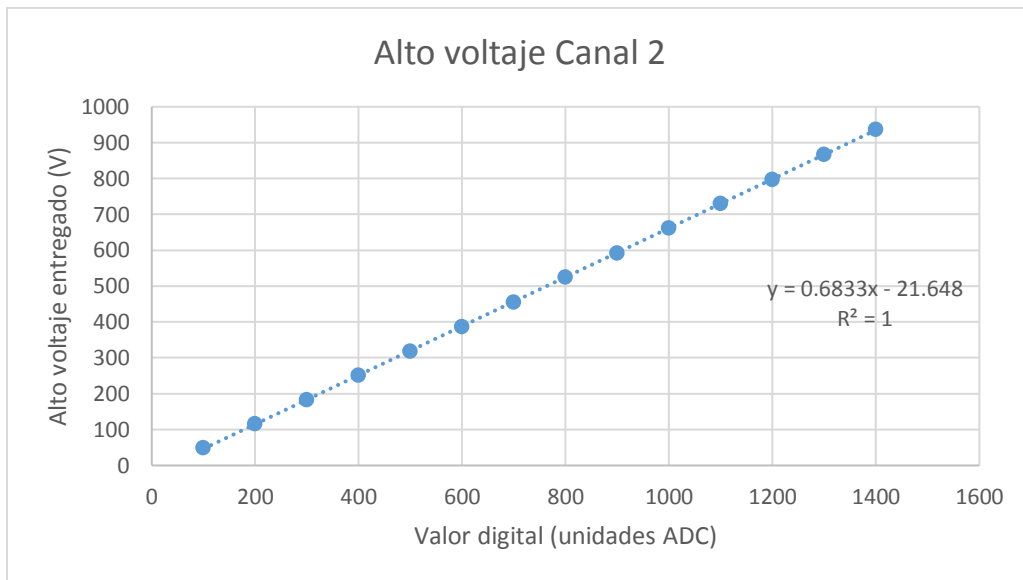


Figura 120. Pulso promedio obtenido en un osciloscopio al polarizar el PMT con 730V.

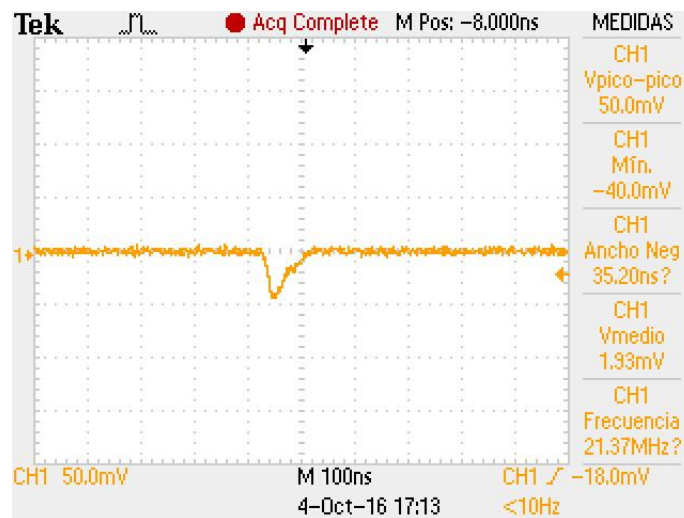


Figura 121. Pulso promedio obtenido en un osciloscopio al polarizar el PMT con 1003V.

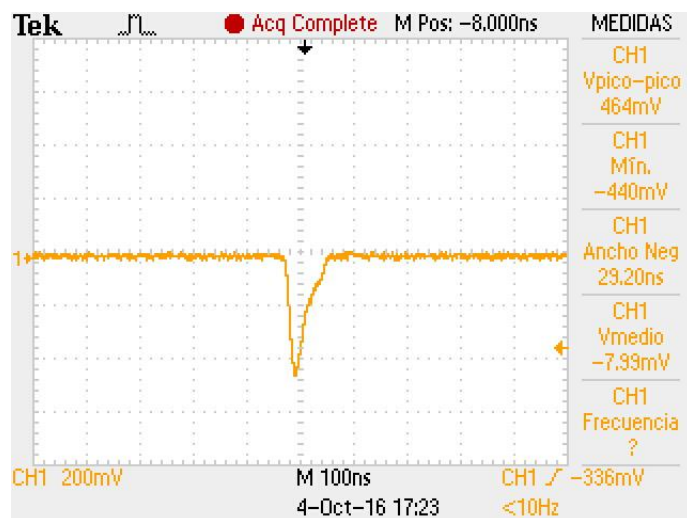
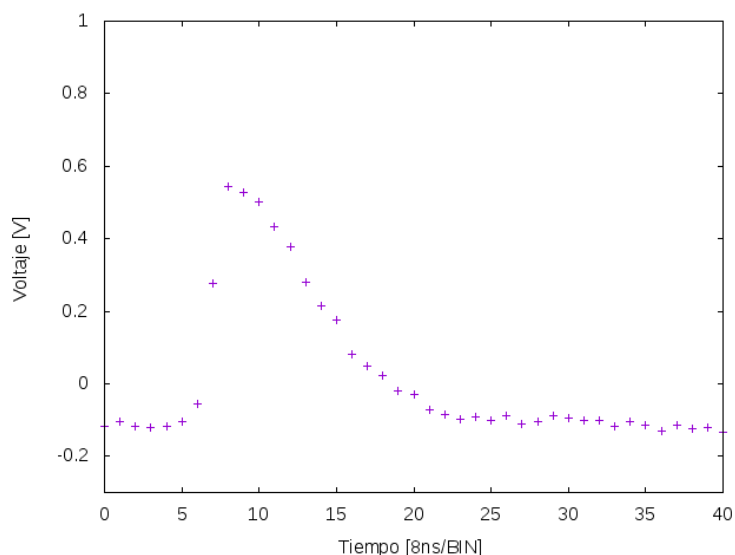


Figura 122. Pulso saturado obtenido en un osciloscopio al polarizar el PMT con 1345V.



Figura 123. Gráfica de los datos de prueba adquiridos por el canal de alta velocidad de Red Pitaya, relacionando voltaje con tiempo.



Este módulo debía investigar y diseñar posibles mejoras a la electrónica de la colaboración LAGO, buscando mejorar específicamente mejorar la calidad de los datos y eficiencia en procesos de calibración. Al implementar el tanque Kinich Ahau, se observó su funcionamiento para luego poder identificar áreas de mejora que pudieran aportar a cumplir el objetivo general del módulo. Adicionalmente se buscó realizar un proceso de investigación sobre la factibilidad del diseño de un sistema de automatización de detectores de radiación Cherenkov que permita hacer más eficiente algunos de los procesos que se dan para la obtención de datos, específicamente buscando mejorar los métodos de calibración del tubo fotomultiplicador. Como último objetivo específico se evaluó la posibilidad de implementar con Red Pitaya la electrónica de adquisición de datos de un detector de radiación Cherenkov, obteniendo una frecuencia de muestreo de 125MHz y una resolución de 14 bits. Así mismo se debía asegurar que esta implementación pudiese comunicarse con sensores de geolocalización, temperatura y presión. Al cumplir con ambos objetivos específicos se tendría tanto una mejora en la calidad de los datos, teniendo más muestras por evento detectado y con mayor resolución; y a la vez se buscaría hacer más eficiente un proceso vital para los detectores, como lo es la calibración del PMT.

El primer objetivo específico buscaba investigar sobre la factibilidad del diseño de un sistema de automatización en detectores, proponía hacer más eficientes procesos vitales para la obtención de datos. La calibración de un PMT es de suma importancia, ya que de esta depende que el sistema de adquisición obtenga pulsos con una amplitud deseable. La amplitud de los pulsos debe ser lo suficientemente grande para que los pulsos sobresalgan de la línea base y sean detectados, y suficientemente controlados para que estos no se saturen y se obtengan pulsos digitalizados los cuales no pueden ser analizados al estar truncados. En la Figura 120 que se encuentra en la sección de resultados, se puede observar un pulso que tiene una amplitud de 40mV, el cual corresponde a un valor digital tras pasar el ADC de 41. Este pulso luego de ser sumado a la línea base controlada por la FPGA, tendrá un valor digital teórico de 91. El valor digital real es menor ya que se generan pérdidas de voltaje cuando la señal entra en la placa de adquisición, volviéndose generalmente en un pulso con un valor digital real de 55 a 60. Esto genera problemas ya que se encuentra dentro del rango en que la señal puede ser considerada como ruido, usualmente el valor más bajo a la que se coloca el disparador es de 75. Por lo tanto, el pulso mostrado en la Figura 120 no sería adquirido por el sistema de adquisición ya que no activaría el disparador.

Contrariamente a lo ocurrido en la Figura 120, el pulso que se puede observar en la Figura 122 se encuentra saturado debido a una amplificación excesiva. El pulso muestra una amplitud de aproximadamente 2V, esto es debido a que el amplificador operacional utilizado para amplificar la señal que sale del ánodo cuenta con un potencial máximo de 2V. El pulso que se observa en dicha figura en realidad tendría una amplitud mayor que de dejarse pasar podría causar daños en la placa de adquisición. Aunque la amplitud se controle y la señal se mantenga constante en 2V al llegar a este valor, uno de los datos que se quieren obtener de estos detectores es la carga que contenía la partícula al atravesar el tanque. Para obtener este dato se busca determinar el área debajo de la curva proporcionada por el ánodo del PMT. Al tener un dato truncado como el mostrado en la Figura 120, no se puede determinar la carga ya que el área debajo de la curva que tendría la partícula se ve afectada al ser cortada en 2V. Al tener una gran cantidad de eventos por

hora, no sería práctico buscar pulsos saturados para descartarlos, por lo que su presencia introduciría error a las mediciones. Es por esto que se debe evitar tener pulsos saturados en la salida del PMT, buscando tener un voltaje de polarización adecuado que no amplifique excesivamente los pulsos.

El pulso que se desea adquirir debe tener una forma como la que presenta la señal en la Figura 121. Este pulso presenta una amplitud de aproximadamente 450mV, que al ser atenuada por la placa de adquisición mantendrá un valor de aproximadamente 400mV. Esta señal es reconocible por el sistema de adquisición, ya que contaría con un valor digital de aproximadamente 410. Pudiendo obtener la carga del evento al obtener el área debajo de la curva de la señal con su forma original. Los resultados aportan al primer objetivo específico, ya que demuestran la necesidad de que el proceso de calibración se realice de manera adecuada. Este proceso puede llevar una cantidad considerable de tiempo ya que se debe ir aumentando y disminuyendo el voltaje hasta obtener la región de voltaje óptima en la que los pulsos se presentarán con una amplitud adecuada. Adicionalmente se debe asegurar que la región encontrada presente un conteo estable de eventos. Esto se puede verificar al realizar barridos de voltaje, anotando la cantidad de eventos por segundo que se dan en cada voltaje. Al realizar varios barridos se debe encontrar una región de voltaje en la que la cantidad de incidencias sea similar, siendo esta la región estable de detección del PMT. Realizar estos barridos manualmente conlleva una gran cantidad de tiempo, por lo que un sistema que realice los barridos automáticamente y analice los datos para encontrar tanto la región estable como pulsos adecuados es una mejora necesaria a realizar y es factible ya que se cuenta con los recursos necesarios para realizarlo, ya que lo único que requiere es un detector funcional.

El sistema de control buscaría autocalibrar la amplificación que debe tener el PMT para obtener los pulsos deseados. Esto se lograría al encontrar el voltaje ideal que debe ser suministrado para polarizar el tubo fotomultiplicador, realizando un barrido de voltajes utilizando el sistema de adquisición ACQUA, con el cual se puede determinar el voltaje que se le está suministrando al PMT si se utiliza el canal de alimentación dos. Ya que existe una relación lineal entre el valor digital ingresado en la terminal de Linux, con el voltaje proporcionado por la fuente de voltaje. Dicha relación se puede observar en la

Figura 119 en la sección de resultados. Esta gráfica posee un coeficiente de correlación de uno, aunque su intercepto no está en cero. Esto se puede deber a no linealidades presentes al suministrar pequeños voltajes de control. La fuente EMCO C20, al estar diseñada para entregar voltajes elevados, llegando hasta los 2000V; no se debe utilizar para entregar voltajes que se podrían obtener de una fuente ordinaria. Adicionalmente, esta incongruencia no afecta a la autocalibración ya que esa zona en donde se presenta la no linealidad está fuera de la zona de trabajo del PMT.

El segundo objetivo específico buscaba evaluar la posibilidad de implementar con Red Pitaya la electrónica de adquisición de datos de un detector de radiación Cherenkov. La Red Pitaya al contar con dos canales de adquisición con frecuencias de operación de hasta 125MHz y resolución de 14 bits, presentaría una mejora a la calidad de los datos obtenidos, ya que se podrían adquirir los pulsos más apegados a la forma que tiene la señal en el dominio continuo. Esto se debe a que al tener mayor resolución y mayor frecuencia de muestreo se tienen más muestras por cada pulso y se tienen más niveles en los cuales se dividirá el rango de la señal. En la Figura 123 encontrada en la sección de resultados, se puede observar la digitalización de una señal sinusoidal con frecuencia de 5MHz y amplitud de 1V, realizada por el canal de adquisición uno de la Red Pitaya. Se puede observar que la gráfica presenta una forma sinusoidal como la que fue ingresada teniendo 27 puntos por cada período de la señal. Se eligió ingresar esta señal ya que el ancho de un pulso del PMT es de aproximadamente 200ns, siendo este valor casi constante y equivalente a una frecuencia de 5MHz. En la Figura 120, Figura 121y Figura 122; se puede observar que el ancho del pulso permanece constante independientemente de la amplitud del pulso. Esto se debe debido al Tyvek y al uniformizar la duración de la señal se puede estandarizar la cantidad de muestras que deben tomar una vez se activa el disparador. Por lo tanto, de las pruebas se puede deducir que se necesitarán aproximadamente 30 muestras por cada pulso detectado. Al compararlo con la electrónica que utiliza Nexys 2, se puede observar que esta contaba únicamente con 12 muestras por evento, elevando el número de muestras por evento por casi un factor de tres. Haciendo que la función principal del sistema de adquisición sea viable e implementable en Red Pitaya mejorando la calidad de la señal.

Red Pitaya cuenta con una librería de comunicación i2c y tiene pines separados para protocolo UART, i2c y SPI. La librería de comunicación i2c es mostrada por la Figura 131 en la sección de anexos. Al utilizar esta librería es posible conectar el sistema de sensores siempre que estos operen con el mismo protocolo de comunicación. Adicionalmente al tener el protocolo UART separado, se puede implementar el sensor de geolocalización que se implementaba con Raspberry Pi anteriormente. Por último, el tener SPI por separado ayuda a la placa secundaria que se adaptará a los puertos, a poder realizar el control de la línea base de la misma manera que se realizaba anteriormente; ya que se le puede entregar una señal SPI a los DAC que se utilizan para dicho control.

El problema que presenta Red Pitaya es la dificultad de almacenar los datos ya que cuenta con una memoria de 8GB en la cual está instalado el sistema operativo. Los datos deben ser almacenados en un archivo temporal y luego enviados a una PC. Al compararlo con el funcionamiento de la Nexys 2, el proceso sería similar por lo que no se pierde nada; ya que la Nexys 2 llenaba un buffer que luego enviaba los datos a una PC. Pudiendo concluir que la Red Pitaya es capaz de implementar el sistema de adquisición LAGO, realizando mejoras a la electrónica y aumentando la calidad de los datos obtenidos.

B. Caracterización del fotomultiplicador

La renovación de la electrónica permitió que se abrieran nuevas fronteras para las mejoras y automatizaciones que tienen los detectores de LAGO. Explorando las posibilidades y necesidades que tiene el proyecto, surgió la idea de crear un sistema de autocalibración para los tanques que utilicen Red Pitaya para adquirir datos.

La calibración de los detectores es un proceso mecanizado que requiere invertir tiempo por parte de los operadores de los detectores. Como se explicó anteriormente, consiste en hacer mediciones en un intervalo de tiempo (de una a dos horas) para barrer todos los voltajes de operación del fotomultiplicador, y replicar esto para cada escala de umbral que tenga la electrónica. Tomando en cuenta esto, el proceso puede llegar a tomar

de cinco días a una semana, dependiendo la disponibilidad de tiempo del operador del detector. Al desarrollar la nueva electrónica, se detectó que esto puede hacerse automáticamente, si se programa la electrónica para que encuentre la región estable del fototubo.

Consiste en correr un programa donde el usuario indique en qué voltaje quiere empezar la calibración (usualmente cuando el PMT empieza a detectar eventos) y cuál es su valor máximo, y de igual manera con el valor de umbral. El programa hará que varíe automáticamente el valor de alto voltaje del fototubo cada hora en incrementos de 100V en 100V con un valor de umbral definido. Al llegar a su valor máximo, repite el proceso con un nuevo valor de umbral. Al realizar el conteo, se realiza un análisis de datos por medio de *k-means*, que permite encontrar la mayor coincidencia de datos de todas las muestras. Es en esa área donde se encuentra la región activa, y el análisis devolverá al usuario este valor sin que haya tenido que invertir tiempo.

Figura 124. Medición manual del barrido de voltaje del fototubo. En el eje horizontal se encuentra el voltaje aplicado y el vertical el flujo de eventos en el detector

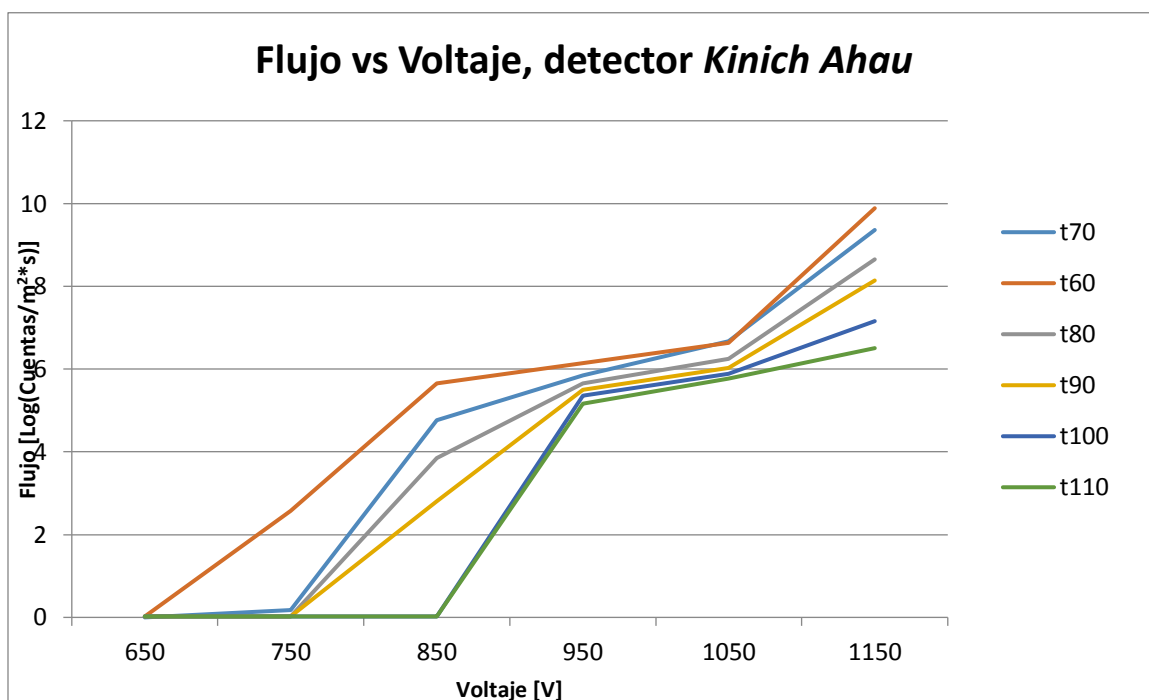
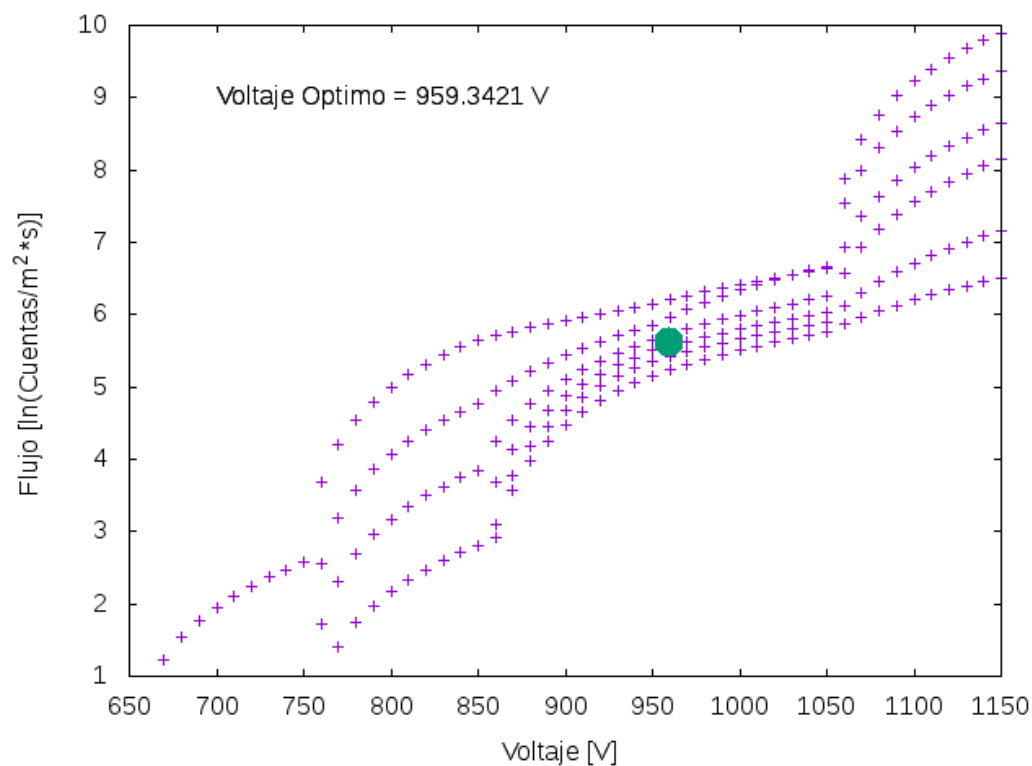


Figura 125. Voltaje óptimo del fotomultiplicador utilizando el algoritmo k-means



XVI. CONCLUSIONES

A. Módulo de caracterización del medio

- En el estudio de la prueba de jarras, realizado sobre de la conductividad y absorbancia, no fue observable el aumento de estas variables por el desarrollo de microorganismos en el medio, por lo que no fue posible analizar el efecto desinfectante de los dos agentes utilizados. A pesar de esto, se infirió que la conductividad variaba por el desarrollo de la reacción de estos agentes en el medio y la posible absorción de dióxido de carbono, la cual es explicada conjuntamente con el aumento de la absorbancia en la región infrarroja de las mediciones realizadas.
- Las mínimas variaciones de las absorbancias (en la región UV-azul del espectro visible), de la prueba de jarras durante cuatro semanas, en la presencia y ausencia de los agentes desinfectantes, permite inferir que el tiempo no afectan en el umbral de detección de Radiación Vavilov-Cherenkov. Asimismo, se puede inferir que, si el agua inicialmente tiene una baja absorción en esta región, no habrá un aumento estadísticamente significativo con el tiempo.
- El difusor interno del tanque, Tyvek, cumple el criterio de dispersión de Rayleigh tanto en el aire, al sumergirlo en agua y aún en la presencia de ácido tricloroisocianúrico, peróxido de hidrógeno y alumbre; por lo que se confirma sus características reflectivas por las cuales se definió como un excelente material para los WCD.
- Sin importar los agentes presentes en el agua utilizada en las mediciones, el coeficiente de reflexión del Tyvek a 650nm, siempre fue menor que en el aire, por la mayor absorbancia de la radiación electromagnética del medio.
- Los umbrales de velocidad para agua ultra pura, agua municipal y en la presencia de ácido tricloroisocianúrico, peróxido de hidrógeno, alumbre, permitieron inferir que para todas (por tener índices de refracción similares) se podrá generar la radiación Vavilov-Cherenkov para partículas que se muevan en el medio a una velocidad arriba del 75% de la velocidad de la luz.

- La diferencia estadísticamente significativa de la señal detectada por el PMT en el agua municipal y el agua tratada, permitieron considerar que una mayor absorbancia, conductividad y turbidez (como el agua tratada), por la presencia de los flóculos e iones, causen una atenuación en la distribución de la radiación Vavilov Cherenkov, y por lo tanto el PMT no detecte la intensidad real generada por las partículas relativistas.
- Los fotoelectrones detectados por el PMT, generados por la emisión de radiación Vavilov-Cherenkov, son estadísticamente similares al haber una atenuación por la presencia de flóculos e iones y al tenerse un espacio limitado para la trayectoria de la partícula en el medio.
- La decantación por gravedad del agua tratada con un agente floculante, no es la forma más viable para la eliminación de los flóculos formados en el agua.

B. Módulo de experimentos en simulación

- Se caracterizaron las señales de pulsos típicos del experimento, obteniendo las amplitudes y tiempos de subida promedio de tres tipos de evento: muones de 4GeV que logran atravesar el tanque, partículas gamma de 100 MeV que producen pares cargados y electrones con energías típicas de la distribución de Michael en el decaimiento de un muón. La relación entre amplitud y tiempo de subida muestra correspondencia con la referencia utilizada, y se encontró que es posible identificar partículas utilizando este parámetro porque los promedios de cada uno son distintos entre sí.
- Se encontró también que la cantidad de fotones detectados en la simulación por muones con energías suficientes para atravesar el tanque depende de la energía de los muones, con una correlación de 10.3 GeV^{-1} y un valor p de 0.006 para la regresión lineal. Este valor es pequeño, y es consistente con las observaciones de que el poder de frenado de los muones en agua es suficientemente bajo para considerar que todos los muones verticales depositan aproximadamente la misma energía en un WCD.
- Se encontró el valor VEM para todos los pulsos de una corrida de 4 horas de K'inich Ahau, de $(190 \pm 20) \text{ ADCq}$. Este histograma se comparó con el

generado por fotones detectados en la simulación, ambos mostrando primero un mínimo y luego un máximo para eventos en los que los muones atraviesan el tanque completamente. De la simulación, además, se determinó que aumentos en la absorción del agua disminuyen la posición del VEM en una proporción de 0.44579 fotones detectados por % de largo de atenuación.

C. Módulo de análisis, calibración y caracterización

- Se logró implementar exitosamente un detector de radiación Vavilov-Cherenkov de agua apegándose a la tecnología y estándares utilizados por la comunidad LAGO.
- Se calibró adecuadamente el WCD implementado, pudiendo diferenciar entre las distintas componentes de las cascadas de rayos cósmicos.
- El clasificador Bayesiano implementado con base en el entrenamiento con datos calibrados tuvo resultados positivos, sugiriendo que mejores implementaciones son viables.
- El algoritmo *k-means* implementado tuvo resultados positivos para $k=3$ y $k=4$, mostrando una clara tendencia de agrupamiento lineal respecto la amplitud de los pulsos. También se obtuvo resultados positivos con el algoritmo *EM-GMM*. Aplicarlo a resultados de la nueva electrónica brindará mejores resultados.
- Los métodos de aprendizaje supervisado y no supervisado utilizados mostraron resultados parecidos, reforzando la validez de esos algoritmos.

D. Módulo de gestión del proyecto

- Las buenas prácticas de la dirección de proyectos permiten una mejor visibilidad de lo que sucede en los distintos módulos de trabajo de un proyecto del cual se tiene poco conocimiento dentro del equipo de trabajo.
- La estructuración de los costos, basados en un calendario de requerimientos permite la ejecución controlada de un proyecto.

- Las distintas áreas de conocimiento abarcadas tienen un impacto sustancial en la ejecución del proyecto, a diferencia de realizar la administración del proyecto de forma lineal y sin relaciones bien establecidas.
- La documentación de las actividades realizadas en esta tercera fase es clave para la continuidad del proyecto LAGO en Guatemala. Con la información recolectada por los distintos módulos, la construcción de más detectores en la Universidad se puede estandarizar.

E. Módulo de adquisición y caracterización del PMT

- Se logró construir un detector de radiación Vavilov-Cherenkov de agua capaz de detectar partículas incidentes que lo atravesen, logrando caracterizar el tipo de partícula detectada y la cantidad de las mismas que son detectadas en determinado tiempo.
- Se logró investigar y diseñar posibles mejoras a la electrónica de la colaboración LAGO, logrando adquirir señales entregadas por un PMT con mejor resolución y mayor cantidad de muestras; y logrando identificar la posibilidad de hacer más eficiente el proceso de calibración.
- Se encontró factible diseñar un sistema de autocalibración en detectores de radiación Cherenkov, permitiendo hacer más eficiente el proceso de calibración. Ya que al ejecutar el programa de autocalibración se obtendrá automáticamente el voltaje óptimo que se le debe suministrar al tubo fotomultiplicador para polarizarlo.
- Se logró comprobar que Red Pitaya es capaz de implementar el sistema de adquisición de un detector de radiación Vavilov-Cherenkov, logrando obtener 125 millones de muestras por segundo con una resolución de 14 bits; y logrando establecer comunicación con sensores con protocolo de comunicación i2c y UART.

XVII. RECOMENDACIONES

A. Módulo de caracterización del medio

- Se recomienda realizar mediciones de las absorbancias (en la región UV-azul espectro visible) y conductividad del agua en el tanque del detector, previas a la toma de datos por el fotomultiplicador. Con base en esto, realizar un análisis de las posibles variaciones y una correlación entre las variables, tanto conforme el tiempo y el posible efecto sobre la intensidad de los pulsos detectados.
- Durante la experimentación realizada, no fue observable el desarrollo de microorganismos en las jarras. Al finalizarse el estudio, se dejaron expuestas a la radiación solar por un mes y en la única jarra en que no se desarrollaron microorganismos en las paredes, fue la que contenía ácido tricloroisocianúrico. Razón por la cual, si en el WCD este agente, se recomienda definir un método de campo para determinar las proporciones de cloro residual en el agua. Así determinar el tiempo de re-aplicación y mantener su capacidad desinfectante.
- Se recomienda realizar mediciones de la reflectividad del Tyvek a diferentes longitudes de onda, utilizando muestras de agua con diferentes absorbancias, turbidez, conductividad e índice de refracción para definir si existe una correlación observable entre estas variables.
- Se recomienda hacer un análisis cinético del proceso de floculación de carbonatos de calcio presentes en muestras de agua municipal. Utilizándose como medios de calibración del estudio analitos controladas de agua ultra pura y arcilla, como lo mencionado por B. Barchelor, J. McEwen y R. Perry (1986)¹⁹. Con base en este análisis designar el tiempo de reacción y eliminación de flóculos.

¹⁹ Barchelor, B.; J. McEwen y R. Perry. (1986). *Kinetics of Aluminium Hydrolysis: Measurement and Characterization of Reaction Products*. Environ. Sci. Technol. 20 (9): 891-894.

- Se recomienda realizar mediciones en el tanque detector con agua con menor conductividad, turbidez y absorbancia (en la región UV-azul del espectro visible) y comparar la intensidad de los pulsos con los obtenidos en agua municipal y el agua tratada con alumbre y peróxido de hidrógeno.

B. Módulo de gestión del proyecto

- La comunicación entre el equipo de trabajo es esencial, se recomienda seguir el mismo esquema de dos reuniones a la semana con reportes de avances y discusiones de estatus del proyecto para las siguientes fases del Megaproyecto.
- Para el administrador del proyecto, es imperativo tener un control de costos y de ingresos detallado.
- Con los entregables de esta fase del proyecto, se puede realizar una propuesta más concreta para solicitar fondos de parte de compañías interesadas en el monitoreo de la actividad solar.
- Para proyectos tecnológicos que requieran de una gestión de proyecto metodológica y fundamentada, la guía del PMBOK proporciona las bases para dirigirlo, por lo que se recomienda a todo estudiante gestor de proyectos entender la metodología de procesos sobre áreas de conocimiento.

C. Módulo de adquisición y caracterización del PMT

- Para quien desee construir un detector de agua Vavilov-Cherenkov se recomienda antes de querer elaborar un diseño propio, elegir un diseño ya probado que pueda replicarse fácilmente, ya que construirlo y echarlo a andar da el entendimiento pleno de qué es un detector y como funciona.
- Para un diseño electrónico aplicado a la detección de partículas que se quiera elaborar en el país, se recomienda tener en consideración que la mayoría de componentes necesarios no están disponibles localmente, por lo que es necesario contar con el tiempo y los recursos suficientes para poder importarlos sin que afecte al cronograma de trabajo.

- Se recomienda también poseer un área exclusiva para el trabajo del detector. Tener un espacio aislado y seguro es una garantía de que se puede trabajar sin factores externos puedan estropear la electrónica de adquisición y el tanque no tenga perturbaciones que alteren la medición de datos.

XVIII. BIBLIOGRAFÍA

1. Alarcón, M. *et al.* 1999. *Calibration and monitoring of water Cherenkov detectors with stopping and crossing muons*. Nuclear Instruments and Methods in Physics. Research A 420: 39-47.
2. Allison, P. *et al.* 2005. *Observing muon decays in water Cherenkov detectors at Pierre Auger Observatory*. 29th International Cosmic Ray Conference Pune 00, 101-104.
3. An, Q., *et al.* 2013. *The performance of a prototype array of water Cherenkov detector for the LHAASO Project*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 724. P. 12-19.
4. Arnaldi, H. 2011. *Interfaces LAGO, Laboratorio de Detección de Partículas y Radiación*, Centro Atómico Bariloche.
5. Arnaldi, H., *et al.* 2011. *Data analysis of the high bandwidth LAGO electronics*. Centro Atómico Bariloche, Argentina. pp. 8.
6. Asorey, H. 2012. *Los detectores Cherenkov del observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación*. Tesis Universidad Nacional de Cuyo. 286 páginas.
7. Asorey, H. y S. Dasso. 2015. *LAGO: the Latin American Giant Observatory*. The 34th International Cosmic Ray Conference. The Hague, Países Bajos.
8. Asorey, H.G., Gómez Berisso, M. 2011. *New LAGO electronic: Getting started*. Centro Atómico Bariloche, Argentina. pp. 6.

9. Audelo, M. *et al.* 2013. *Informe de actividades Año 2012. Colaboración LAGO-Ecuador.*
10. Babayec, E. 2006. *Space Weather Influence on Technological, Biological and Ecological Systems: Some Major Results of Complex Investigations Conducted in Azerbaijan.* SUN and GEOSPHERE. 1 (1): 17-22.
11. Baldini, L. 2014 *Space-Based Cosmic-Ray and Gamma-Ray Detectors: a Review.* Universidad de Pisa. Disponible en: <https://arxiv.org/pdf/1407.7631v2.pdf> [con acceso el 24 de octubre del 2016]
12. Barber, David. 2006. *Machine Learning: A Probabilistic Approach.* 5ta Edición. MIT.
13. Barber, David. 2012. *Bayesian Reasoning and Machine Learning.* Cambridge University Press. pp. 697
14. Bauer, W. y G. Westfall. 2011. *Física para ingeniería y ciencias con física moderna.* McGraw-Hill Educación, México. P. 769.
15. Beran, J. 2010. *Laboratory Manual for Principles of General Chemistry.* 9a ed. John Wiley & Sons, USA. P. 464.
16. Bernlohr, K. 2015. *Cosmic Ray / Gamma ray / Neutrino and similar experiments.* Disponible en: <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CosmicRay/CosmicRaySites.html#cosmic-ray+gamma-ray> [con acceso el 24 de octubre del 2016]
17. Calderon, R, H. Asorey y L. Núñez. *Geant4 based simulation of the Water Cherenkov Detectors of the LAGO project.* Disponible en: <http://arxiv.org/pdf/1503.07270.pdf> [consultado el 4 de julio 2016]

18. Cárdenas, J. y E. Galvis. 2011. *Manual Para La Interpretación Del Perfil De Resistividad Obtenido Al Realizar El Estudio De La Resistividad Del Suelo A Partir De Las Configuraciones Del Método De Wenner*. Universidad tecnológica de Pereira, Colombia. P. 95.
19. Causer, M., 2014. *Raspberry Pi + ITead Studio GPS*. <https://github.com/mcauser/Raspberry-Pi-ITead-Studio-GPS-NEO-6M>. [20/6/2016]
20. Chen, M. et al. 2006. *A study of the water Cherenkov calorimeter*. Preimpresión presentada a *Eliver Science*. Disponible en: <http://arxiv.org/pdf/physics/0602169.pdf> [consultado el 15 de marzo del 2016]
21. Cherenkov, P. 1958. *Radiation of particles moving at a velocity exceeding that of light, and some of the possibilities for their use in experimental physics*. Nobel Lecture. pp. 15.
22. Coombs, K. 2001. *Coombs Printed Circuits Handbook*. McGraw-Hill. Estados Unidos.
23. Cotton, F. y G. Wilkinson. 1972. *Advanced Inorganic Chemistry*. Interscience Publishers, Estados Unidos.
24. Dasso, S. y H. Assorey. 2012. *The Scaler Mode in Pierre Auger Observatory to study heliospheric modulations of cosmic rays*. arXiv:1204.6196
25. De León, R. 2012. *Detector Cherenkov de Agua*. Práctica Final en Licenciatura en Física. Universidad de San Carlos de Guatemala. pp. 30.
26. DuPont. 2009. *Material Safety Data Sheet: DuPont Tyvek® Spunbond Polyethylene*. Estados Unidos. En:

- http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/construction-materials/assets/DuPont_Tyvek_Spunbond_Polyethylene_MSDS_2009-04-21.pdf
27. Durán, M. 2011. *Instalación de un detector Cherenkov de agua para la detección de trazas de rayos cósmicos a 956 metros sobre el nivel del mar*. Escuela de Física, Facultad de Ciencias. Bucaramanga.
 28. EPA. 2016. *Ground Water and Drinking Water*. Estados Unidos. En: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/table-regulated-drinking-water-contaminants#Inorganic>
 29. Etchegoyen, A. *et al.* 1996. *Pierre Auger Project Design Report. Auger Collaboration*.
 30. Filevich, A. 1998. *Spectral-directional reflectivity of Tyvek immersed in water*. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. (423): 108-118.
 31. Frank, I. 1958. *Optics of light sources moving in refractive media*. Nobel Lecture: 442-468.
 32. Frühwirth *et al.* 2000. *Data Analysis Techniques for High-Energy Physics*. 2a ed. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology.
 33. Gaisser, T. 1990. *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press.
 34. García, Luis G. 2015. *Diseño e Implementación de un Sistema de Adquisición de Datos para un Detector GRB en Guatemala*. Trabajo de Graduación, Facultad de Ingeniería, USAC. pp. 206.
 35. Geant4. 2015. *Geant4 User's Guide – For Application Developers*. Disponible en: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/index.html> [consultado el 15 de mayo del 2016]

36. Glynn, H. y G. Heinke. 1999. *Ingeniería Ambiental*. Prentice Hall, México.
37. Griffiths, D. 1999. *Introduction to Electrodynamics*. (3a ed). Prentice Hall, Estados Unidos de America.
38. Grupen, C y B. Shwartz. 2008. *Particle Detectors*. Segunda edición. Cambridge University Press, Reino Unido.
39. Guan, M. *et al.* 2006. *Muon Simulation at the Daya Bay site*. Disponible en: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1006397> [con acceso el 17 de octubre del 2016]
40. Gumplinger, P. 2002. *Optical Photon Processes in GEANT4*. Users' Workshop en SLAC, Universidad de Stanford. Disponible en: <http://geant4.slac.stanford.edu/UsersWorkshop/PDF/Peter/OpticalPhoton.pdf> [con acceso el 19 de octubre del 2016]
41. Hamamatsu Photonics. 1998. *Photomultiplier tube R5912*. Hamamatsu Photonics K.K Electron Tube Center, Japón.
42. Hamamatsu Photonics. 2013. *Photomultiplier Tubes: basics and Applications*. Hamamatsu Photonics K.K Electron Tube Center, Japón. En: http://www.hamamatsu.com/eu/en/hamamatsu/overview/bsd/electron_tube_division/related_documents.html
43. Hamamatsu. 2007. *Photomultiplier Tubes Basics and Applications*. Tercera edición. Disponible en: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf [con acceso el 19 de octubre del 2016]
44. Hao-Oi, LU *et al.* 2009. *Circulation model for water circulation and purification in a Water Cerenkov detector*. CPC (HEP & NP). 33 (7): 567-571.

45. Heck, D. 1998. *CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate Extensive Air Showers*. Disponible en: https://web.ikp.kit.edu/corsika/physics_description/corsika_phys.pdf [con acceso el 18 de marzo del 2016]
46. Hoover, S. *et al.* 2010. *Observation of ultra-high-energy Cosmic Rays with the ANITA Balloon-borne Radio Interferometer*. Disponible en: <https://arxiv.org/pdf/1005.0035v2.pdf> [con acceso el 24 de octubre del 2016]
47. ITGE. 1991. *Minería Química*. Ministerio de Industrias, comercio y turismo secretaria general de la energía y recursos minerales, España.
48. Kajita, T. y A. McDonald. 2015. *The Nobel Prize in Physics 2015*. The Royal Swedish Academy of Science. P. 6.
49. Kurose, J. F., Ross, K. W. 2012. *Computer Networking*. 6ta edition. Pearson. http://www.goodreads.com/work/best_book/80944-computer-networking-a-top-down-approach [16/03/2016]
50. L'Annunziata, M. 2007. *Radioactivity: Introduction and History: Introduction and History*. Elsevier Science, Reino Unido.
51. LAGO. 2015. *The Latin American Giant Observatory*. En: <http://www.lagoproject.org>
52. LAGO. *Wiki Oficial Del Latin American Giant Observatory*. <http://wiki.lagoproject.org> [18/10/2016]
53. Lawrence, E., Livingston, M. 1932. *The Production of High Speed Light Ions without the Use of High Voltages*. Physical Review, 40 (1), pp. 19-35

54. Lenntech. 2015. *Agua Ultrapura*. En:
<http://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/aguaultrapura.htm>
55. Lukens, J., B. Reid y A. Tuggle. 2010. *Experiment in muon Decay*. Universidad de Alabama.
56. McQuail, D. 2000. *McQuail's Mass Communication Theory*. Cuarta edición. Sage, London. pp. 16-34.
57. Mermier, P. y E. Sheldon. 1969. *Physics of Nuclei and Particles*, Vol. 1. Academic Press, Estados Unidos.
58. Mewaldt, R. A., 1996. *Cosmic Rays*. Macmillian Encyclopedia of Physics. http://www.srl.caltech.edu/personnel/dick/cos_encyc.html [11/7/2016]
59. Mitchell, Tom M. 2015. *Chapter 3. Generative and Discriminative Classifiers: Naïve Bayes and Logistic Regression*. Machine Learning. 5ta edición, McGraw Hill.
60. Mitzner, K. 2009. *Complete PCB design using OrCAD Capture and PCB editor*. Elsevier.
61. Morris, K. 2007. *Altium's Alternative: Turning System Design Inside Out. FPGA and Structured ASIC Journal*.
62. Muheim, Franz. *Muon Lifetime Measurement*. <http://www2.ph.ed.ac.uk/~muheim/teaching/projects/muon-lifetime.pdf> [26/10/2016]
63. Muñoz, J., *et al.* 2012. *Física II. Módulo 5: propagación de ondas electromagnéticas*. Universitat Oberta de Catalunya, España. En:

[https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Fisica/Fisica_II_ES/Fisica_II_ES_\(Modulo_5\).pdf](https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Fisica/Fisica_II_ES/Fisica_II_ES_(Modulo_5).pdf)

64. Nielsen, C. 2010. *Calibration through Simulation of a Low-Energy Cherenkov Detector*. Tesis University of California, Santa Barbara. Disponible en: <http://www.physics.ucsb.edu/sites/\secure.lsit.ucsb.edu.phys.d7/files/sitefiles/education/Nielsen.pdf> [con acceso el 2 de junio del 2016]
65. Núñez *et al.* 2013. *Implementación de un protocolo de bajo costo para la purificación del agua de los detectores Cherenkov en altura del proyecto L.A.G.O. LAGO*.
66. Oppenheim, A. *et al.* 1998. *Discrete-Time Signal Processing*. Tercera edición. Nueva Jersey: Prentice-Hall.
67. Osorio, F.; J. Torres y M. Sánchez. 2011. *Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes: Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales*. Edición Días de Santos.
68. Pasco. Advances Chemistry Sensor: PS -2172. *Instruction manual 012-13883B*.
69. Peña R., Jesús. 2015. *Conexión Raspberry Pi – LAGO*. Universidad Industrial de Santander, Colombia. pp. 4.
70. Pérez, Y. 2009. *Caracterización de Detectores Cherenkov en el Proyecto LAGO*. Trabajo especial de grado. Universidad de los Andes.
71. Pérez, Yuniór, 2015. *Aplicación en meteorología especial de los datos del Proyecto LAGO (Latin American Giant Observatory)*. Tesis Postgrado en Física. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes. pp. 84.

72. Photonis. (SF). *Photomultiplier XP1802 Datasheet*. Disponible en: <http://www.qsl.net/k0ff/016%20Manuals/PMT/Photonis/XP1802.pdf> [con acceso el 2 de octubre del 2016]
73. Pinto, G. y B. Rohrig. 2003. *Use of Chloroisocyanurates for Disinfection of Water: Application of Miscellaneous General Chemistry Topics*. Journal of Chemical Education. 80 (1): 41.
74. Quishque, R. y *et al.* 2015. “Panchito” Water Cherenkov Detector: Water studies for the LAGO Collaboration. Nuclear and Particle Physics Proceeding: 433-435.
75. Quitián, H. 2011. *Protocolo de Purificación de Agua*. CEVALE 2 En: http://cevale2.uis.edu.co/~cevale2/wiki/index.php/Protocolo_de_purificacion_de_agua
76. Red Pitaya. 2015. *Especificaciones de Hardware*. <http://redpitaya.com/#hw-specs> [26/10/2016]
77. Rees, W. 2013. *Physical Principles of Remote Sensing*. 3a ed. Cambridge University Press, Estados Unidos de América.
78. Rigola, M. 1990. *Tratamiento de agua industriales: aguas de proceso y residuales*. MARCOMBO, S.A., España.
79. Roldán, G. 2003. Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Editorial Universidad de Antioquía, Colombia.
80. Russell, S. J., Norvig, P. 2010. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 3ra Edición, Prentice Hall. pp. 1132.

81. Salazar, H., Villaseñor, L. 2005. *Separation of cosmic-ray components in a single wáter Cherenkov detector*. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, A 553 (2005). pp. 295-298.
82. Sánchez, O.; M. Herzig. Y E. Peters. 2007. *Perspectivas sobre Conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Instituto Nacional de Ecología,
83. Schüssler, F. 2009. *Measurement of the Energy Spectrum of Ultra-High Energy Cosmic Rays using Hybrid Data of the Pierre Fermilab Observatory*. Centro de Investigación Karlsruhe en la comunidad Helmholtz, Alemania.
84. Segelstein, D. 1981. *The complex refractive index of water*. M. S Tesis, Departamento de física, Universidad de la ciudad de Missouri-Kansas.
85. Seo, E. *et al.* 2004. *Cosmic-ray energetics and mass (CREAM) balloon project. Advances in Space Research 33*. Disponible en: <http://cosmicray.umd.edu/cream/images/stories/files/frontpage/seo.pdf> [con acceso el 24 de octubre del 2016]
86. Shang-q *et al.* 2011. *Optical Properties of water for the Yangbajing water cherenkov detector*. International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging. 8196 8(1): 1-7.
87. Slater, J. y N. Frank. 1947. *Electromagnetismo*. Dover Publications, INC. Estados Unidos.
88. Sofo Haro, M. 2016. *The data acquisition system of the Latin American Giant Observatory. Elsevier Nuclear Instruments and Methods in Physics*. Laboratorio de detección de partículas y radiación. Centro Atómico Bariloche, Argentina.
89. Sofo, M. 2011. *Electrónica LAGO: Guía de conexión de hardware*. Centro Atómico de Bariloche, Argentina. pp. 7.

90. Suarez, M. 2011. *Instalación de un detector Cherenkov de agua para la detección de trazas de rayos cósmicos de 956 metros sobre el nivel del mar*. Universidad Industrial de Santander, España.
91. Suarez, M. 2014. *Seminario Cascadas Aéreas Extensas (EAS) para la colaboración LAGO, Sesión 2*. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=AP9i5pdbJNc> [con acceso el 2 de septiembre del 2015]
92. Thalmann, N., Yuan, Q. 2012. *Enhancing Naïve Bayes with Various Smoothing Methods for Short Text Classification*. pp. 2
93. USAC. (2016). *Laboratorio de instrumentación de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
94. Villaseñor, L y *et al.* 2011. *Search for Gamma Ray Bursts and Forbush Decreases in the LAGO Observatory*. International Cosmic Ray Conference, China. (10): 314-317.
95. Watson, A. 2002. *Extensive Air Shower and Ultra High Energy Cosmic Rays*. Disponible en: <http://www.ast.leeds.ac.uk/Auger/augerthesis/mexlects3.pdf> [con acceso el 21 de octubre del 2016]
96. Young, S. 2001. *Computerized Data Acquisition and Analysis for the Life Sciences*. Cambridge University Press.

XIX. ANEXOS

A. Más detalle de la geometría en la simulación

Cuadro 59. Descripción de los objetos en la simulación y sus jerarquías lógicas

Nombre	Volumen madre (posición)	Material	Tipo	Dimensiones
World	Ninguno	Aire	G4Box	1 metro por lado
Tyvek	World (0,0,0)	Tyvek	G4Cons	Radio interno a = 0m Radio interno b = 0m Radio externo a = 40.1m Radio externo b = 40.1m Altura = 57.1 cm Ángulo mínimo = 0° Ángulo máximo = 360°
Agua	Tyvek (0,0,0)	Agua	G4Cons	Radio interno a = 0m Radio interno b = 0m Radio externo a = 40. m Radio externo b = 40. m Altura = 57.1 cm Ángulo mínimo = 0° Ángulo máximo = 360°
Vidrio PMT	Agua (0,0,57cm)	Borosilicato	G4Sphere	Radio interno = 0m Radio externo = 11.4 cm Ángulo Φ mínimo = 0° Ángulo Φ que abarca = 360° Ángulo θ mínimo = 0° Ángulo θ que abarca = 360°
Fotocátodo PMT	Vidrio PMT (0,0,0)	Aluminio	G4Sphere	Radio interno = 0m Radio externo = 11.1 cm Ángulo Φ mínimo = 0° Ángulo Φ que abarca = 360° Ángulo θ mínimo = 0° Ángulo θ que abarca = 360°
Vacío dentro PMT	Fotocátodo PMT (0,0,0)	Vacío	G4Sphere	Radio interno = 0m Radio externo = 11. cm Ángulo Φ mínimo = 0° Ángulo Φ que abarca = 360° Ángulo θ mínimo = 0°

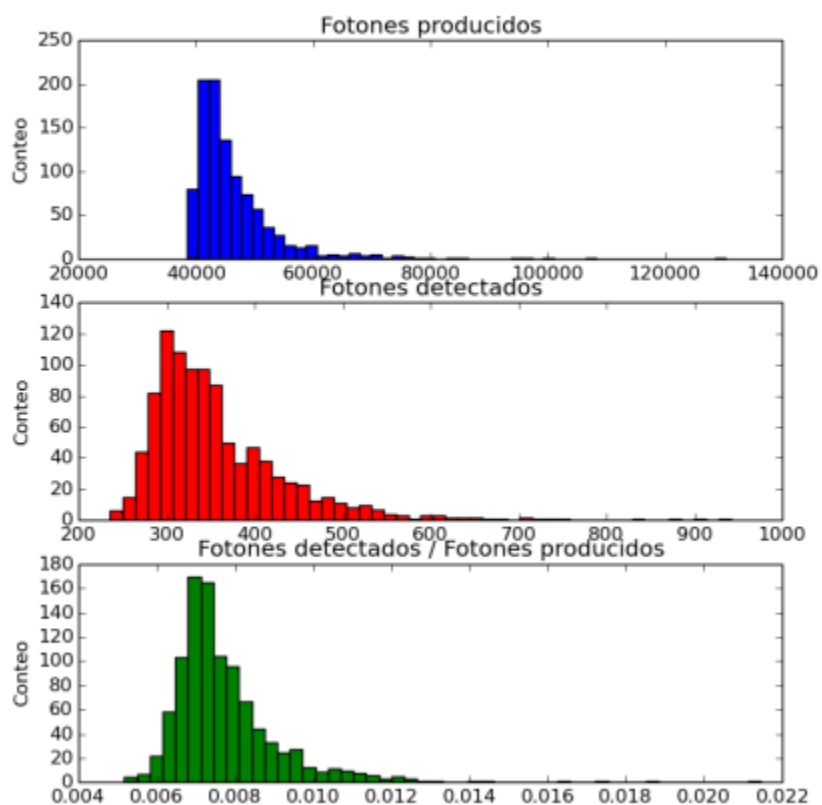
Ángulo θ que abarca = 360
°

Cuadro 60. Propiedades de material asignadas al agua en la simulación a través de G4MaterialsPropertiesTable y asignadas a 32 energías de fotón

Energía del fotón (eV)	Índice de refracción	Largo de atenuación (m)	Energía del fotón (eV)	Índice de refracción	Largo de atenuación (m)
2.034	1.3435	3.448	2.757	1.3522	55.556
2.068	1.344	4.082	2.82	1.353	52.632
2.103	1.3445	6.329	2.885	1.3535	52.632
2.139	1.345	9.174	2.954	1.354	47.619
2.177	1.3455	12.346	3.026	1.3545	45.455
2.216	1.346	13.889	3.102	1.355	41.667
2.256	1.3465	15.152	3.181	1.3555	37.037
2.298	1.347	17.241	3.265	1.356	33.333
2.341	1.3475	18.868	3.353	1.3568	30
2.386	1.348	20	3.446	1.3572	28.5
2.433	1.3485	26.316	3.545	1.358	27
2.481	1.3492	35.714	3.649	1.3585	24.5
2.532	1.35	45.455	3.76	1.359	22
2.585	1.3505	47.619	3.877	1.3595	19.5
2.64	1.351	52.632	4.002	1.36	17.5
2.697	1.3518	52.632	4.136	1.3608	14.5

B. Normalidad de fotones producidos y detectados en la simulación

Figura 126. Histogramas de los fotones producidos, fotones detectados y el cociente de los fotones detectados sobre los producidos para un muón vertical de 4GeV en la simulación, con un tamaño muestral de 1000 eventos



Los histogramas en la

Figura 126 sugieren que las distribuciones no siguen una distribución normal. Como complemento se usó la prueba Shapiro-Wilk para las hipótesis:

Fotones producidos

- H_{1o} : La distribución de fotones producidos para el evento de un muón vertical tiene normalidad
- H_{1a} : La distribución de fotones producidos para el evento de un muón vertical no tiene normalidad

Fotones detectados

- H_{2o} : La distribución de fotones detectados para el evento de un muón vertical tiene normalidad
- H_{2a} : La distribución de fotones detectados para el evento de un muón vertical no tiene normalidad

Cociente de fotones detectados sobre fotones producidos

- H_{3o} : La distribución del cociente de fotones detectados sobre fotones producidos para el evento de un muón vertical tiene normalidad
- H_{3a} : La distribución del cociente de fotones detectados sobre fotones producidos para el evento de un muón vertical no tiene normalidad

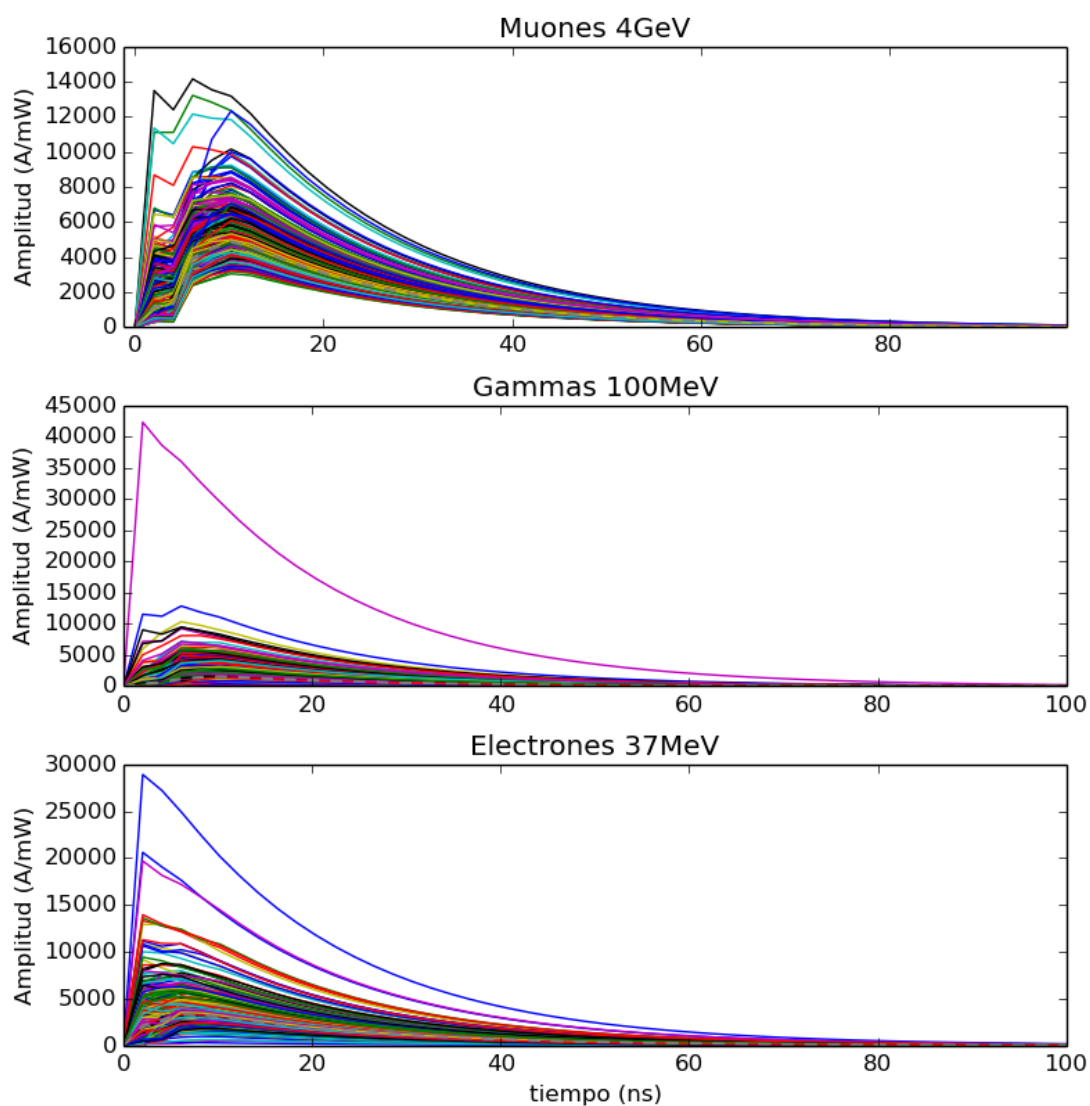
Cuadro 61: Valores p para la prueba Shapiro-Wilk de normalidad de las distribuciones de los fotones producidos, detectados y el cociente

Distribución	Valor p de la prueba
Fotones producidos	5.923 e-32
Fotones detectados	1.718 e-39
Fotones detectados / Fotones producidos	9.683 e-34

Por los valores por la prueba Shapiro-Wilk y por la forma de los histogramas, se concluye que ninguna de las distribuciones tiene normalidad.

C. Gráficas de los 2000 pulsos analizados para la caracterización de la simulación

Figura 127. a) 1000 pulsos sobrepuestos de las detecciones de fotones para muón vertical de 4GeV, b) 500 pulsos sobrepuestos de las detecciones de fotones para partículas gamma de 100 MeV, c) 500 pulsos sobrepuestos de las detecciones de fotones para electrón de Michael de 37 MeV



D. Análisis de resultados: módulo de caracterización del medio

Los modelos e hipótesis del análisis de varianza (ANOVA) realizado a las mediciones de conductividad y absorbancia de las Pruebas de Jarras y la señal detectada por el PMT, se encuentran presentes en las páginas siguientes.

1. Prueba de Jarras

a. Análisis de varianza: Conductividad

MODELO

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + u_{ijk}$$

$k = k$ -ésima medición de conductividad (1, 2, ..., a)

$i = 1, 2, 3$

$j = I, II, III, IV$

- y_{ijk} = variable respuesta, representa la conductividad k asignada a la jarra i y la semana j
- μ = media global; efecto constante, común a todos los niveles de los factores.
- τ_i : Efecto medio producido por la i -ésima jarra
- β_j : Efecto medio producido por la j -ésima semana j
- $(\tau\beta)_{ij}$: Efecto medio producido por la interacción entre la i -ésima jarra y la j -ésima semana.
- u_{ijk} : efecto del error experimental asociado a la ijk -ésima unidad experimental.

HIPÓTESIS GENERAL

- Efecto de toma de datos semanalmente en las medias de conductividad de las Jarras:

$$H_0: \beta_I = \beta_{II} = \beta_{III} = \beta_{IV}$$

$$H_a: \beta_I \neq \beta_{II} \neq \beta_{III} \neq \beta_{IV}$$

En donde I, II, III, IV corresponden al número de semanas.

- Efecto del tratamiento realizado a cada jarra en medias de conductividad tomadas semanalmente:

$$H_o: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3$$

$$H_a: \tau_1 \neq \tau_2 \neq \tau_3$$

En donde 1, 2, 3 corresponden a las Jarras 1 (control), 2 (tratada con 107.19 ± 0.44 ppm ácido tricloroisocianúrico), 3 (tratada con $0.99 \pm 4.46 \cdot 10^{-3}$ mL/L peróxido de hidrógeno) respectivamente.

- Efecto del tratamiento realizado a cada jarra y mediciones semanales en medias de conductividad.

$$H_o: (\tau\beta)_{i,j} = (\tau\beta)_{i',j'}, \forall i, j$$

$$H_a: (\tau\beta)_{i,j} \neq (\tau\beta)_{i',j'}, \forall i, j$$

Regla de decisión: la diferencia de las medias con los diferentes tratamientos es significativas al nivel 0.05, con un 95% de confianza

b. Análisis de varianza: Absorbancias de 380 a 950 nm

MODELO

$$y_{ijgk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \psi_g + (\tau\beta)_{ij} + (\psi\tau)_{gi} + (\beta\psi)_{gj} + u_{ijk}$$

k = k-ésima absorbancia

i = 1, 2, 3

j = I, II, III, IV

g = g-ésima longitud de onda (1, 2, 3, ... a)

- y_{ijk} = variable respuesta, representa la k-esima absorbancia asignada a la i-ésima jarra, la j-ésima semana y g-ésima longitud de onda
- μ = media global; efecto constante, común a todos los niveles de los factores.
- τ_i : Efecto medio producido por la i-ésima jarra
- β_j = Efecto medio producido por la j-ésima semana
- ψ_g = Efecto medio producido por la g-ésima longitud de onda
- $(\tau\beta)_{ij}$ = Efecto medio producido por la interacción entre la i-ésima jarra y la j-ésima semana.
- $(\psi \tau)_{gi}$ = Efecto medio producido por la interacción entre la i-ésima jarra y la g-ésima longitud de onda.
- $(\beta\psi)_{gj}$ = Efecto medio producido por la interacción entre la j-ésima semana y la g-ésima longitud de onda
- u_{ijk} : efecto del error experimental asociado a la ijgk-esima unidad experimental.

HIPÓTESIS GENERAL

- Efecto de toma de datos semanalmente en las medias de absorbancia de las Jarras:

$$H_0: \beta_I = \beta_{II} = \beta_{III} = \beta_{IV}$$

$$H_a: \beta_I \neq \beta_{II} \neq \beta_{III} \neq \beta_{IV}$$

En donde I, II, III, IV corresponden al número de semanas.

- Efecto del tratamiento realizado a cada jarra en medias de absorbancia tomadas semanalmente:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3$$

$$H_a: \tau_1 \neq \tau_2 \neq \tau_3$$

En donde 1, 2, 3 corresponden a las Jarras 1 (control), 2 (tratada con 107.19 ± 0.44 ppm ácido tricloroisocianúrico), 3 (tratada con $0.99 \pm 4.46 \cdot 10^{-3}$ mL/L peróxido de hidrógeno) respectivamente.

- Efecto medio producido por la longitud de onda de absorción de las jarras tomadas semanalmente.

$$H_0: \psi_1 = \dots = \psi_a$$

$$H_a: \psi_1 \neq \dots \neq \psi_a$$

En donde, 1, ..., a corresponden a las longitudes de onda de 380 a 950 nm (de escala de 10 en diez)

- Efecto del tratamiento realizado a cada jarra y mediciones semanales en medias de absorbancia.

$$H_0: (\psi\beta)_{g,j} = (\psi\beta)_{g',j'}, \forall g, j$$

$$H_a: (\psi\beta)_{g,j} \neq (\psi\beta)_{g',j'}, \forall g, j$$

- Efecto medio producido por la interacción entre la j-ésima semana y la g-ésima longitud de onda sobre la absorbancia

$$H_0: (\psi\tau)_{g,i} = (\psi\tau)_{g',i'}, \forall g, i$$

$$H_a: (\psi\tau)_{g,i} \neq (\psi\tau)_{g',i'}, \forall g, i$$

- Efecto del tratamiento realizado a cada jarra y mediciones semanales en medias de absorbancia.

$$H_0: (\tau\beta)_{i,j} = (\tau\beta)_{i',j'}, \forall i, j$$

$$H_a: (\tau\beta)_{i,j} \neq (\tau\beta)_{i',j'}, \forall i, j$$

Regla de decisión: la diferencia de las medias con los diferentes tratamientos es significativas al nivel 0.05, con un 95% de confianza.

2. Análisis de varianza: Análisis de señal

MODELO

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + u_{ijk}$$

$$(k = 1, 2, \dots, a; i=1, 2, \dots, b; j = I, II, III)$$

- y_{ijk} = variable respuesta, representa la k -ésima Señal (ADC_p) asignada al i -ésimo bin y j -ésimo medio de medición.
- μ = media global; efecto constante, común a todos los niveles de los factores.
- τ_i : Efecto medio producido por el i -ésimo bin
- β_j : Efecto medio producido por el j -ésimo medio de medición
- $(\tau\beta)_{ij}$: Efecto medio producido por la interacción entre el i -ésimo bin y el j -ésimo medio de medición
- u_{ijk} : efecto del error experimental asociado a la ijk -ésima unidad experimental.

HIPÓTESIS GENERAL

- Efecto medio producido por el medio de medición en la Señal (ADC_p) asignada

$$H_0: \beta_I = \beta_{II} = \beta_{III}$$

$$H_a: \beta_I \neq \beta_{II} \neq \beta_{III}$$

En donde I, II, III a los tres diferentes medios de medición: PMT sumergido en agua municipal, PMT en el aire, PMT en agua tratada con Alumbre y H₂O₂.

- Efecto medio producido por el número de bin en la Señal (ADC_p) asignada

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_b$$

$$H_a: \tau_1 \neq \tau_2 \neq \dots \neq \tau_b$$

El tiempo de la señal analizada fue hasta 12 bin (x 25ns), por lo que b=12

- Efecto medio producido por número de bin y por el medio de medición en la Señal (ADC_p) asignada

$$H_0: (\tau\beta)_{i,j} = (\tau\beta)_{i',j'}, \forall i, j$$

$$H_a: (\tau\beta)_{i,j} \neq (\tau\beta)_{i',j'}, \forall i, j$$

Regla de decisión: la diferencia de las medias con los diferentes tratamientos es significativa al nivel 0.05, con un 95% de confianza.

E. Apoyo del uso de Red Pitaya

Figura 128. Obtenido de (Red Pitaya, 2016). Funciones generales y de manipulación de puertos en C para Red Pitaya.

General	
int	rp_Init ()
int	rp_Release ()
int	rp_Reset ()
const char *	rp_GetVersion ()
rp_calib_params_t	rp_GetCalibrationSettings ()
const char *	rp_GetError (int errorCode)
Digital Input/Output	
int	rp_DpinReset ()
int	rp_DpinSetState (rp_dpin_t pin, rp_pinState_t state)
int	rp_DpinGetState (rp_dpin_t pin, rp_pinState_t *state)
int	rp_DpinSetDirection (rp_dpin_t pin, rp_pinDirection_t direction)
int	rp_DpinGetDirection (rp_dpin_t pin, rp_pinDirection_t *direction)
Analog Input/Output	
int	rp_ApinReset ()
int	rp_ApinGetValue (rp_apin_t pin, float *value)
int	rp_ApinGetValueRaw (rp_apin_t pin, uint32_t *value)
int	rp_ApinSetValue (rp_apin_t pin, float value)
int	rp_ApinSetValueRaw (rp_apin_t pin, uint32_t value)
int	rp_ApinGetRange (rp_apin_t pin, float *min_val, float *max_val)

Figura 129. Obtenida de (Red Pitaya, 2016). Funciones en C de adquisición de datos de los puertos de alta frecuencia para Red Pitaya.

Acquire	
int	<code>rp_AcqSetDecimation (rp_acq_decimation_t decimation)</code>
int	<code>rp_AcqGetDecimation (rp_acq_decimation_t *decimation)</code>
int	<code>rp_AcqGetDecimationFactor (uint32_t *decimation)</code>
int	<code>rp_AcqSetSamplingRate (rp_acq_sampling_rate_t sampling_rate)</code>
int	<code>rp_AcqGetSamplingRate (rp_acq_sampling_rate_t *sampling_rate)</code>
int	<code>rp_AcqGetSamplingRateHz (float *sampling_rate)</code>
int	<code>rp_AcqSetAveraging (bool enabled)</code>
int	<code>rp_AcqGetAveraging (bool *enabled)</code>
int	<code>rp_AcqSetTriggerSrc (rp_acq_trig_src_t source)</code>
int	<code>rp_AcqGetTriggerSrc (rp_acq_trig_src_t *source)</code>
int	<code>rp_AcqGetTriggerState (rp_acq_trig_state_t *state)</code>
int	<code>rp_AcqSetTriggerDelay (int32_t decimated_data_num)</code>
int	<code>rp_AcqGetTriggerDelay (int32_t *decimated_data_num)</code>
int	<code>rp_AcqSetTriggerDelayNs (int64_t time_ns)</code>
int	<code>rp_AcqGetTriggerDelayNs (int64_t *time_ns)</code>
int	<code>rp_AcqSetTriggerLevel (float voltage)</code>
int	<code>rp_AcqGetTriggerLevel (float *voltage)</code>
int	<code>rp_AcqSetTriggerHyst (float voltage)</code>
int	<code>rp_AcqGetTriggerHyst (float *voltage)</code>
int	<code>rp_AcqSetGain (rp_channel_t channel, rp_pinState_t state)</code>
int	<code>rp_AcqGetGain (rp_channel_t channel, rp_pinState_t *state)</code>
int	<code>rp_AcqGetGainV (rp_channel_t channel, float *voltage)</code>
int	<code>rp_AcqGetWritePointer (uint32_t *pos)</code>
int	<code>rp_AcqGetWritePointerAtTrig (uint32_t *pos)</code>
int	<code>rp_AcqStart ()</code>
int	<code>rp_AcqReset ()</code>
uint32_t	<code>rp_AcqGetNormalizedDataPos (uint32_t pos)</code>
int	<code>rp_AcqGetDataPosRaw (rp_channel_t channel, uint32_t start_pos, uint32_t end_pos, int16_t *buffer, uint32_t *buffer_size)</code>
int	<code>rp_AcqGetDataPosV (rp_channel_t channel, uint32_t start_pos, uint32_t end_pos, float *buffer, uint32_t *buffer_size)</code>
int	<code>rp_AcqGetDataRaw (rp_channel_t channel, uint32_t pos, uint32_t *size, int16_t *buffer)</code>
int	<code>rp_AcqGetOldestDataRaw (rp_channel_t channel, uint32_t *size, int16_t *buffer)</code>
int	<code>rp_AcqGetLatestDataRaw (rp_channel_t channel, uint32_t *size, int16_t *buffer)</code>
int	<code>rp_AcqGetDataV (rp_channel_t channel, uint32_t pos, uint32_t *size, float *buffer)</code>
int	<code>rp_AcqGetOldestDataV (rp_channel_t channel, uint32_t *size, float *buffer)</code>
int	<code>rp_AcqGetLatestDataV (rp_channel_t channel, uint32_t *size, float *buffer)</code>
int	<code>rp_AcqGetBufSize (uint32_t *size)</code>

Figura 130. Obtenido de (Red Pitaya, 2016). Funciones en C para generación de señales de alta frecuencia para Red Pitaya.

Generate

int	rp_GenReset ()
int	rp_GenOutEnable (rp_channel_t channel)
int	rp_GenOutDisable (rp_channel_t channel)
int	rp_GenOutIsEnabled (rp_channel_t channel, bool *value)
int	rp_GenAmp (rp_channel_t channel, float amplitude)
int	rp_GenGetAmp (rp_channel_t channel, float *amplitude)
int	rp_GenOffset (rp_channel_t channel, float offset)
int	rp_GenGetOffset (rp_channel_t channel, float *offset)
int	rp_GenFreq (rp_channel_t channel, float frequency)
int	rp_GenGetFreq (rp_channel_t channel, float *frequency)
int	rp_GenPhase (rp_channel_t channel, float phase)
int	rp_GenGetPhase (rp_channel_t channel, float *phase)
int	rp_GenWaveform (rp_channel_t channel, rp_waveform_t type)
int	rp_GenGetWaveform (rp_channel_t channel, rp_waveform_t *type)
int	rp_GenArbWaveform (rp_channel_t channel, float *waveform, uint32_t length)
int	rp_GenGetArbWaveform (rp_channel_t channel, float *waveform, uint32_t *length)
int	rp_GenDutyCycle (rp_channel_t channel, float ratio)
int	rp_GenGetDutyCycle (rp_channel_t channel, float *ratio)
int	rp_GenMode (rp_channel_t channel, rp_gen_mode_t mode)
int	rp_GenGetMode (rp_channel_t channel, rp_gen_mode_t *mode)
int	rp_GenBurstCount (rp_channel_t channel, int num)
int	rp_GenGetBurstCount (rp_channel_t channel, int *num)
int	rp_GenBurstRepetitions (rp_channel_t channel, int repetitions)
int	rp_GenGetBurstRepetitions (rp_channel_t channel, int *repetitions)
int	rp_GenBurstPeriod (rp_channel_t channel, uint32_t period)
int	rp_GenGetBurstPeriod (rp_channel_t channel, uint32_t *period)
int	rp_GenTriggerSource (rp_channel_t channel, rp_trig_src_t src)
int	rp_GenGetTriggerSource (rp_channel_t channel, rp_trig_src_t *src)
int	rp_GenTrigger (int mask)

Figura 131. Obtenido de (Red Pitaya, 2016). Funciones en C para comunicación i2C para Red Pitaya.

I2C

```
int rp_I2cRead (int addr, char *data, int length)
int rp_I2cWrite (int addr, char *data, int length)
```

Figura 132. Código escrito en C cuya función muestrear una señal a una frecuencia de 125MHz.

```
/* Prueba de adquisicion en Red Pitaya basada en el ejemplo
 * on trigger signal acquisition. */

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>
#include "redpitaya/rp.h"

int main(int argc, char **argv){

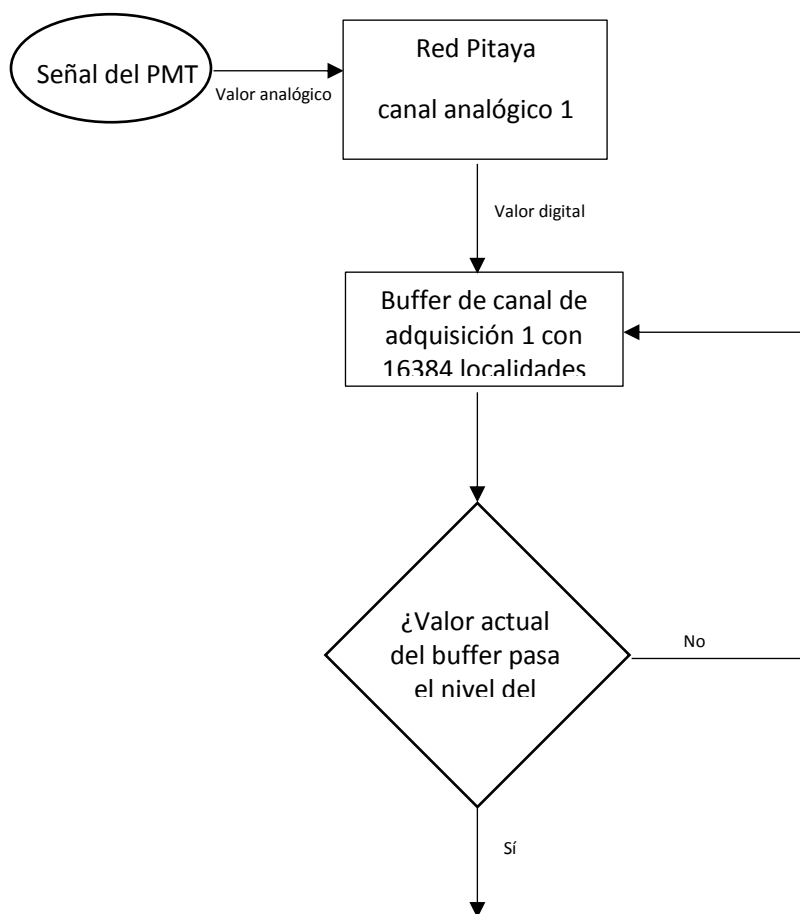
    /* Print error, if rp_Init() function failed */
    if(rp_Init() != RP_OK){
        fprintf(stderr, "Rp api init failed!\n");
    }

    /*Se configura el canal de adquisicion 1 para muestrear a 125MHz*/
    rp_AcqReset();
    /*Se debe especificar que se esta trabajando con el jumper en posicion HV*/
    rp_AcqSetGain(RP_CH_1,RP_HIGH);
    rp_AcqSetSamplingRate(RP_SMP_125M);
    rp_AcqSetTriggerLevel(-0.05); //Trig level is set in Volts
    rp_AcqSetTriggerDelay(30);
    while(1){
        rp_AcqStart();
        /*Se indica que el trigger se activara cuando en el canal 1 se tenga un flanco positivo*/

        rp_AcqSetTriggerSrc(RP_TRIG_SRC_CHA_NE);
        uint32_t buff_size=100;
        float *buff = (float *)malloc(buff_size * sizeof(float));
        uint32_t *pos1 = (uint32_t *)malloc(sizeof(uint32_t));
        rp_acq_trig_state_t state = RP_TRIG_STATE_TRIGGERED;
        while(1){
            rp_AcqGetTriggerState(&state);
            if(state == RP_TRIG_STATE_TRIGGERED){
                break;
            }
        }

        rp_AcqGetWritePointerAtTrig(pos1);
        /*Al dispararse el trigger se recogen los siguientes 30 eventos ya que este numero de pulsos$
        *muestrearan al utilizar un PMT*/
        uint32_t start_pos = pos1[0]-30;
        uint32_t end_pos = pos1[0]+30;
        printf("%d\n", pos1[0]);
        rp_AcqGetDataPosV(RP_CH_1,start_pos,end_pos,buff,&buff_size);
        int i;
        for(i=0; i<buff_size;i++){
            printf("%f\n",buff[i]);
        }
        /* Releasing resources */
        free(buff);
    }
    rp_Release();
    return 0;
}
```

Figura 133. Diagrama de flujo del programa de adquisición en Red Pitaya al conectarse al PMT



F. Red de actividades: módulo de gestión del proyecto

Figura 134. Diagrama de red de actividades para la realización del proyecto.

