

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



Estudio de pre factibilidad del proyecto hidroeléctrico de la Finca El Paraíso de Secanquim utilizando las cuencas del río Sayté, el río Chisay y la quebrada Muquilá ubicados en el municipio de Santa María Cahabón del departamento de Alta Verapaz

Trabajo de graduación presentado por Andrés Scheel Holtmann para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala  
2011





Estudio de pre factibilidad del proyecto hidroeléctrico de la Finca  
El Paraíso de Secanquim utilizando las cuencas del río Sayté, el  
río Chisay y la quebrada Muquilá ubicados en el municipio de  
Santa María Cahabón del departamento de Alta Verapaz

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



Estudio de pre factibilidad del proyecto hidroeléctrico de la Finca El Paraíso de Secanquim utilizando las cuencas del río Sayté, el río Chisay y la quebrada Muquilá ubicados en el municipio de Santa María Cahabón del departamento de Alta Verapaz

Trabajo de graduación presentado por Andrés Scheel Holtmann para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala  
2011

Vo. Bo. :

(f)

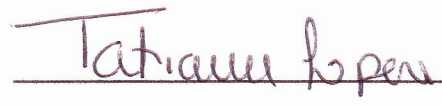


---

Ingeniero Jorge Lamas  
Asesor

Tribunal Examinador:

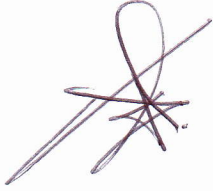
(f)



---

Ingeniera Tatiana Lopera Posada

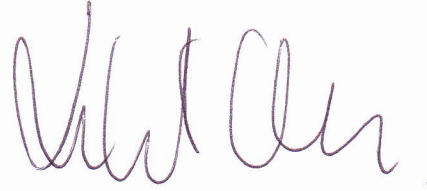
(f)



---

Ingeniero Fredy Estuardo Viana Vidal

(f)



---

Ingeniero Roberto Godo Levensen

Fecha de aprobación: Guatemala, 09 de noviembre de 2011

## ÍNDICE

Contenido	Página
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABLAS.....	XIII
LISTA DE MAPAS.....	XIX
LISTA DE GRÁFICAS.....	XX
RESUMEN.....	XXI
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
III. ANTECEDENTES.....	4
A. Historia de la electrificación en Guatemala.....	4
1. El proceso del cambio.....	5
B. Funcionamiento de la oferta y demanda de la red nacional.....	6
C. Tipos de centrales hidroeléctricas.....	7
1. Según su régimen de flujo.....	7
a. Central hidroeléctrica a filo de agua.....	7
b. Central hidroeléctrica con embalse de reserva.....	8
1) Casa de máquinas al pie de la presa.....	9
2) Aprovechamiento por derivación del agua.....	10
c. Central hidroeléctrica por bombeo.....	11
2. Clasificación.....	12
a. Según la potencia instalada.....	12
b. Según la caída.....	13
D. Antecedentes hidrológicos.....	13
1. Balance hídrico.....	13
2. Evapotranspiración.....	17
3. Radiación solar.....	17
4. Humedad relativa.....	17
5. Temperatura.....	18
6. Viento.....	18
7. Métodos para determinar la evapotranspiración.....	18

a.	Métodos directos.....	18
1)	Método del lisímetro.....	19
2)	Evapotranspirómetro de Thornthwaite.....	19
3)	Atmómetro de Livingstone.....	20
4)	Método gravimétrico.....	21
b.	Algunos métodos indirectos o empíricos usados comúnmente.	21
1)	Método de Thornthwaite.....	22
2)	Método de Turc.....	23
3)	Método de Blaney y Criddle.....	24
4)	Método racional utilizando la curva de Hansen.....	29
5)	Método de Grassi y Christensen.....	31
6)	Método usando un tanque evaporímetro tipo "A".....	32
7)	Método de Penman simplificado.....	34
8)	Metodología para obtener la evapotranspiración potencial.....	34
8.	Cuenca.....	35
a.	Trazo de una cuenca.....	36
9.	Infiltración.....	36
a.	Proceso de infiltración.....	37
b.	Medición de la infiltración.....	38
1)	Infiltrómetro de flujo.....	38
2)	Infiltrómetros de lluvia.....	39
10.	Curva de garantía de caudales.....	39
E.	Antecedentes hidráulicos .....	40
1.	Diseño de canales.....	40
a.	Cálculo de la velocidad en un canal: Fórmulas de Chézy y Manning.....	40
2.	Medición práctica del caudal por el método del flotador.....	43
3.	Diseño del desarenador.....	44
4.	Cálculo de pérdidas por fricción método de Darcy-Weisbach.....	47
F.	Conceptos hidroenergéticos.....	49
1.	Potencia.....	49



2.	Energía.....	50
3.	Energía hidráulica.....	50
G.	Antecedentes financieros.....	51
1.	Cálculo de la tasa de descuento o tasa mínima atractiva de retorno....	51
2.	Tasas de intereses del banco G&T para préstamos en dólares de magnitudes similares a los proyectos definidos en este estudio de pre factibilidad.....	51
3.	Precio histórico Spot promedio mensual de la energía en US \$ .....	53
IV.	CONDICIONES NATURALES DEL TERRENO.....	54
A.	Topografía.....	54
B.	Precipitación.....	55
C.	Condiciones Geológicas.....	56
1.	Peridotita.....	57
2.	Diques de Gabro.....	57
D.	Cuencas.....	58
E.	Caudales.....	62
1.	Balance hídrico.....	62
2.	Cálculo de caudales mediante el método de evapotranspiración de Turc.....	62
3.	Curvas de garantía de caudales.....	63
4.	Medición empírica del caudal del río Sayté.....	65
a.	Ubicación del punto de medición.....	65
b.	Velocidad del río Sayté.....	66
c.	Medición del área transversal del río Sayté.....	69
d.	Caudales.....	76
e.	Discusión y conclusión.....	77
V.	SELECCIÓN DE ESQUEMAS.....	79
VI.	ESQUEMA 1(Central con embalse y con aprovechamiento por derivación).....	81
A.	Área de inundación.....	81
B.	Movimiento de tierras y accesos a la obra.....	82
1.	Costos.....	83

C.	Caudales de diseño.....	83
D.	Presa.....	84
	1. Costos.....	85
E.	Canales.....	85
	1. Costos.....	88
F.	Desarenador.....	88
	1. Costos.....	89
G.	Cámara de presión.....	89
	1. Costos.....	90
H.	Tubería forzada.....	90
	1. Costos.....	91
I.	Casa de máquinas.....	91
	1. Costos.....	92
J.	Costos de Equipamiento.....	92
K.	Subestación e interconexión.....	92
	1. Costos.....	93
L.	Resumen de costos totales por caudal de diseño.....	93
M.	Esquema hidroenergético.....	95
	1. Caída.....	95
	2. Potencia.....	95
	3. Energía.....	96
	4. Ingresos .....	97
N.	Análisis del aumento del costo de las estructuras respecto al aumento del ingreso.....	98
	1. Equipamiento.....	98
	2. Canal.....	99
	3. Tubería forzada.....	99
	4. Costos totales.....	100
O.	Análisis financiero con 100% del capital financiado con bancos .....	100
VII.	ESQUEMA 2(central hidroeléctrica a filo de agua) .....	104
A.	Movimiento de tierras y accesos a la obra.....	104
	1. Costos.....	105

B.	Caudales de diseño.....	106
C.	Estructura para desviar el río Sayté (bocatoma).....	106
	1. Costos.....	107
D.	Canales.....	107
	1. Costos.....	111
E.	Desarenador.....	111
	1. Costos.....	111
F.	Cámara de presión.....	112
	1. Costos.....	112
G.	Tubería forzada.....	113
	1. Costos.....	113
H.	Casa de máquinas.....	114
	1. Costos.....	114
I.	Costos de equipamiento.....	115
J.	Subestación e interconexión.....	115
	1. Costos.....	115
K.	Resumen de costos totales por caudal de diseño.....	116
L.	Esquema hidroenergético.....	118
	1. Caída.....	118
	2. Potencia.....	118
	3. Energía.....	118
	4. Ingresos.....	120
M.	Análisis del aumento del costo de las estructuras respecto al aumento del ingreso.....	121
	1. Equipamiento.....	121
	2. Canal.....	122
	3. Tubería forzada.....	122
	4. Costos totales.....	123
N.	Análisis financiero con 100% del capital financiado con bancos .....	123
VIII.	ESQUEMA 3(Central hidroeléctrica de embalse con cuarto de máquinas al pie de la presa).....	127
A.	Área de inundación.....	128



B.	Movimiento de tierras y accesos a la obra.....	128
1.	Costos.....	129
C.	Caudales de diseño.....	129
D.	Presa.....	130
1.	Costos.....	131
E.	Desarenador.....	131
1.	Costos.....	131
F.	Cámara de presión.....	132
G.	Tubería forzada.....	132
1.	Costos.....	132
H.	Casa de máquinas.....	133
1.	Costos.....	133
I.	Costos de equipamiento.....	133
J.	Subestación e interconexión.....	134
1.	Costos.....	134
K.	Resumen de costos totales por caudal de diseño.....	134
L.	Esquema hidroenergético.....	137
1.	Caída.....	137
2.	Potencia.....	137
3.	Energía.....	137
4.	Ingresos.....	138
M.	Análisis del aumento del costo de las estructuras respecto al aumento del ingreso.....	139
1.	Equipamiento.....	140
2.	Tubería forzada.....	140
3.	Costos totales.....	141
N.	Análisis financiero con 100% del capital financiado con bancos .....	142
IX.	CONCLUSIONES.....	146
X.	RECOMENDACIONES.....	148
XI.	BIBLIOGRAFÍA.....	149
XII.	APÉNDICE.....	151

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Planta de embalse con cuarto de máquinas al pie de la presa.....	9
Figura 2: Perfil de embalse con cuarto de máquinas al pie de la presa.....	9
Figura 3: Esquema de embalse con cuarto de máquinas al pie de la presa.....	10
Figura 4: Planta de aprovechamiento por derivación.....	10
Figura 5: Perfil de aprovechamiento por derivación.....	11
Figura 6: Hidroeléctrica de bombeo.....	12
Figura 7: Términos del balance hídrico.....	16
Figura 8: Peridotita .....	57
Figura 9: Dique de Gabro.....	57
Figura 10: Cuenca Sayté.....	58
Figura 11: Cuenca Chisay.....	59
Figura 12: Cuenca Muquilá.....	60
Figura 13: Ubicación de la medición en campo del caudal.....	62
Figura 14: Área transversal río Sayté 17.5.09.....	70
Figura 15: Área transversal río Sayté 7.6.09.....	71
Figura 16: Área transversal río Sayté 29.6.09.....	72
Figura 17: Área transversal río Sayté 2.8.09.....	73
Figura 18: Área transversal río Sayté 6.9.09.....	74
Figura 19: Área transversal río Sayté 20.9.09.....	75
Figura 20: Medición empírica del caudal.....	77
Figura 21: Esquema 1.....	81
Figura 22: Área de inundación esquema 1.....	82
Figura 23: Vista en planta y área transversal típica excavación esquema 1.....	82
Figura 24: Sección típica de excavación y relleno esquema 1.....	83
Figura 25: Perfil de la presa esquema 1.....	84
Figura 26: Área trasversal de canales rectangulares según caudal de diseño esquema 1.....	87
Figura 27: Esquema básico de la cámara de presión para el esquema 1.....	90
Figura 28: Ejemplo similar de la casa de máquinas esquema 1.....	92
Figura 29: Esquema 2.....	104

Figura 30: Vista en planta y área transversal típica excavación esquema 2.....	105
Figura 31: Sección típica de excavación y relleno esquema 2.....	105
Figura 32: Área trasversal de canales rectangulares según caudal de diseño esquema 2.....	110
Figura 33: Esquema básico de la cámara de presión para el esquema 2.....	112
Figura 34: Ejemplo similar de la casa de máquinas esquema 2.....	114
Figura 35: Esquema 3.....	127
Figura 36: Esquema de una central hidroeléctrica con la casa de máquinas al pie de la presa.....	127
Figura 37: Área de inundación esquema 3.....	128
Figura 38: Perfil de la presa esquema 3.....	130
Figura 39: Sección transversal de la presa esquema 3.....	130
Figura 40: Finca el “Paraíso de Secanquim” posicionado con Google Earth.....	151
Figura 41: Colocación de varas de referencia .....	152
Figura 42: Varas colocadas a 5.5 metros de distancia entre si .....	152
Figura 43: Medición de la longitud transversal del río Sayté .....	153
Figura 44: Medición de la longitud transversal del río Sayté .....	153
Figura 45: Medición de la longitud transversal del río Sayté .....	154
Figura 46: Medición de la longitud transversal del río Sayté .....	154
Figura 47: Medición de la profundidad transversal del río Sayté.....	155
Figura 48: Medición de la profundidad transversal del río Sayté.....	155
Figura 49: Flotador para la medición de la velocidad del río Sayté .....	156
Figura 50: Flotador para la medición de la velocidad del río Sayté .....	156
Figura 51: Fondo relativamente plano del río Sayté área de medición.....	157
Figura 52: Río Sayté y Río Chisay en el lugar de convergencia .....	157



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Tipo de central según la potencia instalada.....	12
Tabla 2: Tipo de central según la caída.....	13
Tabla 3: Ejemplo de evapotranspiración real de Turc.....	24
Tabla 4: Coeficientes globales usados en la fórmula de Blaney y Criddle.....	26
Tabla 5: Valores de la expresión $\left(\frac{T + 17.8}{21.8}\right)$ en relación con temperaturas medias (°C) .....	27
Tabla 6: Valor de “p” según la latitud y el mes.....	28
Tabla 7: Coeficientes periódicos de uso consuntivo en función del ciclo vegetativo..	32
Tabla 8: Radiación (Latitud Norte).....	34
Tabla 9: Porcentaje de brillo solar (Latitud Norte).....	35
Tabla 10: Rugosidades de Manning según la superficie.....	41
Tabla 11: Secciones típicas para canales.....	42
Tabla 12: Pendientes laterales en canales según tipo de suelo.....	42
Tabla 13: Ejemplo de tasa de interés en dólares 1.....	52
Tabla 14: Ejemplo de tasa de interés en dólares 2 .....	52
Tabla 15: Leyenda de tipos de suelo.....	56
Tabla 16: Cálculo de caudales método de Turc para cada río y la suma de todos.....	63
Tabla 17: Caudal clasificados para cada sub cuenca y la suma de todos, Método de Turc.....	63
Tabla 18: Tiempos y velocidades del río Sayté 17.05.09.....	66
Tabla 19: Tiempos y velocidades del río Sayté 7.06.09.....	67
Tabla 20: Tiempos y velocidades del río Sayté 29.06.09.....	67
Tabla 21: Tiempos y velocidades del río Sayté 2.08.09.....	68
Tabla 22: Tiempos y velocidades del río Sayté 6.09.09.....	68
Tabla 23: Tiempos y velocidades del río Sayté 20.09.09.....	69
Tabla 24: Resumen de tiempos y velocidades del río Sayté.....	69
Tabla 25: Área transversal del río Sayté 17.05.09.....	70
Tabla 26: Área transversal del río Sayté 7.06.09.....	71
Tabla 27: Área transversal del río Sayté 29.06.09.....	72

Tabla 28: Área transversal del río Sayté 2.08.09.....	73
Tabla 29: Área transversal del río Sayté 6.09.09.....	74
Tabla 30: Área transversal del río Sayté 20.09.09.....	75
Tabla 31: Caudales promedio por fecha.....	76
Tabla 32: Caudales promedio por fecha sin crecidas.....	76
Tabla 33: Costo de movimientos de tierra esquema 1.....	83
Tabla 34: Criterios de caudales de diseño esquema 1.....	83
Tabla 35: Resultados de criterios de diseño de caudales del esquema 1.....	84
Tabla 36: Costos de la presa esquema 1.....	85
Tabla 37: Canal rectangular esquema 1.....	85
Tabla 38: Capacidad de paso de los canales rectangulares esquema 1.....	86
Tabla 39: Canal trapezoidal esquema 1.....	86
Tabla 40: Capacidad de paso del canal trapezoidal esquema 1.....	86
Tabla 41: Canal circular esquema 1.....	87
Tabla 42: Capacidad de paso para los canales circulares esquema 1.....	87
Tabla 43: Costos de los canales rectangulares según su caudal de diseño esquema 1.....	88
Tabla 44: Coeficiente para cálculo de pérdidas por fricción tubería de acero.....	90
Tabla 45: Dimensiones, velocidad y perdidas tubería forzada esquema 1.....	91
Tabla 46: Espesor, peso y costo de tubería forzada esquema 1.....	91
Tabla 47: Costo de equipamiento esquema 1.....	92
Tabla 48: Resumen de costos para el caudal medio esquema 1.....	93
Tabla 49: Resumen de costos para el 80% del caudal medio esquema 1.....	94
Tabla 50: Resumen de costos para el 120% del caudal medio esquema 1.....	94
Tabla 51: Resumen de costos para 6X el caudal garantizado 95% del tiempo esquema 1.....	95
Tabla 52: Potencia según el caudal esquema 1.....	96
Tabla 53: Producción de energía total anual del río Sayté para el esquema 1.....	96
Tabla 54: Energía total anual producida por cada caudal de diseño.....	97
Tabla 55: Ingresos anuales según el caudal esquema 1.....	97
Tabla 56: Aumento de ingresos con base al ingreso más pequeño, esquema 1.....	98

Tabla 57: Aumento del costo por equipamiento con base al costo más pequeño, esquema 1.....	98
Tabla 58: Relación del aumento del costo de equipamiento respecto al aumento del ingreso, esquema 1.....	98
Tabla 59: Aumento del costo del canal con base al costo más pequeño, esquema 1.....	99
Tabla 60: Relación del aumento del costo del canal respecto al aumento del ingreso, esquema 1.....	99
Tabla 61: Aumento del costo de la tubería forzada respecto al costo más pequeño esquema 1.....	99
Tabla 62: Relación del aumento del costo de la tubería forzada respecto al aumento del ingreso, esquema 1.....	99
Tabla 63: Relación del aumento del costo respecto al aumento del ingreso, esquema 1.....	100
Tabla 64: Análisis financiero con el caudal medio, esquema 1, 100% financiado con deuda.....	101
Tabla 65: Análisis financiero con el 80% del caudal medio, esquema 1, 100% financiado con deuda.....	102
Tabla 66: Análisis financiero con el 120% del caudal medio, esquema 1, 100% financiado con deuda.....	102
Tabla 67: Análisis financiero con 6X el caudal garantizado el 95% del tiempo, esquema 1, 100% financiado con deuda.....	103
Tabla 68: Movimientos de tierra esquema 2.....	105
Tabla 69: Criterios de diseño de caudales esquema 2.....	106
Tabla 70: Resultado de los criterios de caudales de diseño esquema 2.....	106
Tabla 71: Canal rectangular esquema 2.....	107
Tabla 72: Capacidad de paso de los canales rectangulares.....	108
Tabla 73: Canal trapezoidal.....	108
Tabla 74: Capacidad de paso del canal trapezoidal.....	108
Tabla 75: Canales circulares.....	109
Tabla 76: Capacidad de paso para los canales circulares.....	109
Tabla 77: Costo de los canales según su caudal de diseño esquema 2.....	111



Tabla 78: Coeficiente para cálculo de pérdidas por fricción tubería de acero.....	113
Tabla 79: Diámetro, velocidad y perdidas tubería forzada esquema 2 según caudal de diseño.....	113
Tabla 80: Espesor, peso y costo de la tubería forzada según caudal de diseño esquema 2.....	114
Tabla 81: Costo por Equipamiento Sayté Esquema 2.....	115
Tabla 82: Resumen de costos con caudal medio esquema 2.....	116
Tabla 83: Resumen de costos con el 80% del caudal medio esquema 2.....	117
Tabla 84: Resumen de costos con el 120% del caudal medio esquema 2.....	117
Tabla 85: Potencia según el caudal de diseño esquema 2.....	118
Tabla 86: Producción de energía total anual del río Sayté para el esquema 2.....	119
Tabla 87: Energía total anual producida por cada caudal de diseño esquema 2.....	119
Tabla 88: Ingresos anuales según el caudal de diseño, esquema 2.....	120
Tabla 89: Aumento de ingresos con base al ingreso más pequeño, esquema 2.....	121
Tabla 90: Aumento del costo por equipamiento con base al costo más pequeño, esquema 2.....	121
Tabla 91: Relación del aumento del costo de equipamiento respecto al aumento del ingreso, esquema 2.....	121
Tabla 92: Aumento del costo por canal con base al costo más pequeño, esquema 2.....	122
Tabla 93: Relación del aumento del costo del canal respecto al aumento del ingreso, esquema 2.....	122
Tabla 94: Aumento del costo de la tubería forzada respecto al costo más pequeño esquema 2.....	122
Tabla 95: Relación del aumento del costo de la tubería forzada respecto al aumento del ingreso, esquema 2.....	122
Tabla 96: Relación del aumento del costo respecto al aumento del ingreso, esquema 2.....	123
Tabla 97: Análisis financiero usando el caudal medio, esquema 2, financiando el proyecto con 100% deuda.....	124
Tabla 98: Análisis financiero usando el 80 % del caudal medio, esquema 2, financiando el proyecto con 100% deuda.....	125

Tabla 99: Análisis financiero usando el 120% del caudal medio, esquema 2, financiando el proyecto con 100% deuda.....	126
Tabla 100: Movimientos de tierra esquema 3.....	129
Tabla 101: Criterio de caudales de diseño para el esquema 3.....	129
Tabla 102: Resultado para los criterios de caudales de diseño para el esquema 3.....	129
Tabla 103: Costos de la presa del esquema 3.....	131
Tabla 104: Coeficiente para cálculo de pérdidas por fricción tubería de acero.....	132
Tabla 105: Diámetros, velocidades y pérdidas en la tubería forzada según el caudal de diseño esquema 3.....	132
Tabla 106: Espesor, peso y costo de la tubería forzada según el caudal de diseño esquema 3.....	133
Tabla 107: Costo por equipamiento Esquema 3.....	133
Tabla 108: Costo totales con el caudal medio, Esquema 3.....	135
Tabla 109: Costo totales con 80% del caudal medio, Esquema 3.....	135
Tabla 110: Costo totales con 120% del caudal medio, Esquema 3.....	136
Tabla 111: Costo totales con 6X el caudal garantizado el 95% del tiempo, Esquema 3.....	136
Tabla 112: Potencia según el caudal de diseño, Esquema 3.....	137
Tabla 113: Producción de energía total anual del río Sayté, Chisay y la quebrada Muquilá para el esquema 3.....	138
Tabla 114: Energía total anual producida por cada caudal de diseño, esquema 3.....	138
Tabla 115: Ingresos anuales según el caudal de diseño, esquema 3.....	139
Tabla 116: Aumento de ingresos con base al ingreso más pequeño, esquema 3.....	139
Tabla 117: Aumento del costo por equipamiento con base al costo más pequeño, esquema 3.....	140
Tabla 118: Relación del aumento del costo de equipamiento respecto al aumento del ingreso, esquema 3.....	140
Tabla 119: Aumento del costo de la tubería forzada respecto al costo más pequeño, esquema 3.....	140
Tabla 120: Relación del aumento del costo de la tubería forzada respecto al aumento del ingreso, esquema 3.....	141



Tabla 121: Relación del aumento del costo respecto al aumento del ingreso, esquema 3.....	141
Tabla 122: Análisis financiero usando el caudal medio, esquema 3, financiando el proyecto con 100% de deuda.....	142
Tabla 123: Análisis financiero usando el 80% del caudal medio, esquema 3, financiando el proyecto con 100% de deuda.....	143
Tabla 124: Análisis financiero usando el 120% del caudal medio, esquema 3, financiando el proyecto con 100% de deuda.....	144
Tabla 125: Análisis financiero usando 6X el caudal garantizado el 95% del tiempo, esquema 3, financiando el proyecto con 100% de deuda.....	144

## LISTA DE MAPAS

Mapa 1: Ubicación de medición en campo de caída .....	55
Mapa 2: Isoyetas medias anual (mm) del área de estudio .....	55
Mapa 3: Mapa geológico de la Finca El Paraíso de Secanquim.....	56
Mapa 4: Cuenca del río Sayté .....	60
Mapa 5: Cuenca del río Chisay .....	61
Mapa 6: Cuenca de la quebrada Muquilá.....	61

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Curva del despacho de carga.....	7
Gráfica 2: Curva de garantías de caudal .....	39
Gráfica 3: Diagrama de Moody para el factor de fricción.....	49
Gráfica 4: Precio Spot histórico de la energía.....	53
Gráfica 5: Curva de garantías de caudal para el río Sayté.....	63
Gráfica 6: Curva de garantías de caudal para el río Chisay.....	64
Gráfica 7: Curva de garantías de caudal para la quebrada Maquila.....	64
Gráfica 8: Curva de garantías de caudal total.....	64

## RESUMEN

Este trabajo determina la prefactibilidad del proyecto hidroeléctrico de la Finca El Paraíso de Secanquim utilizando diferentes esquemas que incluyen según el caso las cuencas del río Sayté, el río Chisay y la quebrada Muquilà, estableciendo la curva de garantía de caudales para los ríos Sayté y Chisay así como de la quebrada Muquilà. Los datos se obtienen en gabinete utilizando mapas topográficos con curvas de nivel a cada 25 metros para delimitar las cuencas y de isoyetas que determinan la precipitación del lugar. Se hace un trabajo de campo para corroborar el caudal que se obtiene en gabinete por medio de las isoyetas del río Sayté.

De igual manera y con acceso a mapas topográficos con curvas de nivel a cada 5 metros se determina la caída en un lugar específico. Esto se corrobora nuevamente en campo.

Usando nuevamente las curvas de nivel a cada 5 metros para propósitos de diseño se definen tres esquemas principales para un potencial análisis de producción hidroenergética teniendo como limitante las colindancias de la finca El Paraíso de Secanquim para la ubicación de la obra civil. Para cada esquema se toman cuatro caudales de diseño para analizar las variaciones tanto en el costo de las estructuras como en la producción e ingresos por concepto de venta de energía, potencia y bonos.

Se hace un análisis financiero para determinar la viabilidad económica de cada caudal de diseño. Se usa 100% con deuda a bancos para hacer los números más conservadores ya que los bancos financian aproximadamente un 60% a 70%.

Finalmente se hacen las recomendaciones necesarias dado a que ninguna propuesta en este estudio es económicamente viable, pero las conclusiones del por qué sucede esto son de gran importancia para definir el siguiente paso a tomar para delimitar un esquema de generación eficiente y rentable.

## I. INTRODUCCIÓN

El proyecto donde se hará el estudio de pre factibilidad se ubica dentro del sector eléctrico de la República de Guatemala. Persigue el aprovechamiento del recurso hídrico de la cuenca del río Sayté, Chisay y la quebrada Muquilà ubicados en el municipio de Santa María Cahabón del departamento de Alta Verapaz, para producción de energía eléctrica. La infraestructura y proyecto en general será realizado dentro de la Finca El Paraíso de Secanquim paralelo al tramo del río Sayté y la intersección de los ríos Sayté, Chisay y la quebrada Muquilà, que están ubicados dentro de la misma, por lo que no habrá terceras personas afectadas e involucradas en la obra civil del proyecto.

El sector eléctrico, la población y el país en general, han vivido y resentido recientemente y en el pasado el impacto de las variaciones del precio internacional del petróleo en el precio de energía eléctrica. La dependencia de los precios internacionales del petróleo traslada a los consumidores las variaciones e inestabilidad ocasionadas por este recurso no renovable. Los agentes comercializadores que realizan contratos de venta de mediano y largo plazo con distribuidores y consumidores mayores en el área de energías, se encuentran muy interesados en contar cada vez más con recursos como generadores hidroeléctricos, pues los precios de tales suministros son más estables en el tiempo y no presentan la volatilidad que sufren las fuentes que dependen del petróleo.

La energía producida mediante recurso hídrico sustituirá producción existente o evitará la instalación y el uso de igual capacidad de generación producida con recurso fósil. La producción de una central incrementará la relación porcentual actual entre la energía limpia y aquella generada con combustible fósil. También contribuirá a mejorar la balanza de pagos del país evitando el gasto de divisas por la compra de combustibles fósiles que se adquieren en el extranjero.

Los beneficiarios del desarrollo del proyecto serán en su orden: La sociedad propietaria del proyecto; Las áreas y territorios cercanos al sitio de ubicación del proyecto, al ser una fuente local de trabajo directo, fomentando la actividad económica del sector; la población del país, al integrarse la energía producida por el



económica del sector; la población del país, al integrarse la energía producida por el proyecto a la oferta total de energía eléctrica nacional, que además disminuye en cierto grado la dependencia de derivados del petróleo y con eso ayuda a mejorar la balanza comercial evitando la adquisición de combustibles fósiles en el mercado internacional y la correspondiente erogación de divisas.

En términos más generales, otros beneficios sociales son la creación de empleos, ya sea por la necesidad o consumo de productos locales por parte del proyecto a por la creación de infraestructura para ingresar al mismo y con esto se fomentará el crecimiento del comercio y turismo local.

El embalse e infraestructura en general estará situado dentro de cañones montañosos ya existentes dentro de la finca por lo que no existirá ningún desplazamiento poblacional o daños importantes por inundaciones al permanecer el cauce del río igual, es decir, la morfología del río no cambia.

El impacto ambiental es bajo a moderado ya que es energía limpia, es decir utiliza combustible renovable (agua), evitándose la producción de emisiones de gases contaminantes al ambiente y la atmósfera como el CO<sub>2</sub>. No se generan residuos ni contaminantes que perjudiquen la fauna y flora existente, aprovechando al máximo el recurso hídrico.

Específicamente para este trabajo se consideran tres diferentes esquemas de generación donde se sitúan las diferentes estructuras en áreas propicias definidas por la geología del lugar. Estas estructuras y su ubicación son definidas al inicio de la presentación de cada esquema.

## II. OBJETIVOS

### A. General:

1. Determinar mediante un estudio general de pre factibilidad si algún esquema del proyecto hidroeléctrico de la finca “El Paraíso de Secanquím” tiene el potencial para proseguir con un estudio más detallado de factibilidad.

### B. Específicos:

1. Con las características del lugar determinar la curva de caudales teórico para los ríos Sayté, Chisay y la quebrada Muquilá.

2. Comparar el caudal teórico del río Sayté con resultados empíricos tomados durante diferentes fechas del mismo río.

3. Establecer los caudales de diseño.

4. Definir tres esquemas hidroenergéticos posibles para observar el comportamiento general y el cambio en el diseño de sus estructuras el costo y la respectiva generación de energía según los diferentes caudales de diseño que se utilizarían.

5. Determinar de una manera general los costos e ingresos de cada esquema para establecer si el aumento del costo de cada estructura se justifica por el aumento en el ingreso según cada caudal de diseño que se use.

6. Con el comportamiento de flujos financieros para cada esquema en un lapso de 25 años, definir la posible viabilidad económica de cada esquema del proyecto.

7. Recomendar según los resultados, el paso a seguir con el proyecto.

### III. ANTECEDENTES

#### A. Historia de electrificación en Guatemala

La generación de energía eléctrica en Guatemala, se inicia en 1884 al instalarse la primera hidroeléctrica en la finca El Zapote, al norte de la capital. Al año siguiente se forma la Empresa Eléctrica del Sur por empresarios alemanes que instalaron la hidroeléctrica Palín de 732 KW., la cual brindó servicio a los departamentos de Guatemala, Sacatepéquez y Escuintla.

En 1927 se construye la hidroeléctrica Santa María, con el fin de proveer de energía al Ferrocarril de los Altos. Cuando este medio de transporte desapareció, las autoridades de gobierno deciden que la planta se oriente a cubrir la demanda de los departamentos de Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá y Suchitepéquez. En 1940, se crea el Departamento de Electrificación Nacional, dependencia del Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas y dicha planta se convierte en la Hidroeléctrica del Estado.

A mediados de la década de los cincuenta se inicia la construcción en Zacapa de la Hidroeléctrica Río Hondo. Posteriormente gracias a los esfuerzos de los Ingenieros Oswaldo Santizo y José Manuel Dengo el 27 de Mayo de 1959 fue creado el Instituto Nacional de Electrificación -INDE-; por medio del decreto 1287. siendo su primer presidente el Ingeniero Martín Prado Vélez.

Durante la década de los años 30 el Ingeniero Oswaldo Santizo había construido las hidroeléctricas de Patzún en Chimaltenango, y la de Patulul en Suchitepéquez. Dentro de los bienes iniciales del INDE estaban la hidroeléctrica Santa María y la de Río Hondo que se encontraba en construcción. Esta planta fue puesta en operación en 1962 con una capacidad de 2400 KW.

Debido al crecimiento de la demanda de energía eléctrica y para atender los planes de electrificación, en 1965 fue puesta en operación la Central Diesel de San Felipe, Retalhuleu, con una capacidad e 2440 KW. Seis años más tarde fue instalada una turbina de gas en la finca Mauricio, en Escuintla, con una capacidad de 12,500 KW.



En ese mismo período el INDE amplió la capacidad de la planta Santa María a 6,880 KW.

A principios de la década de los setenta se instaló la Hidroeléctrica Jurún Marinalá. En 1982 inició operaciones la Hidroeléctrica Aguacapa y en 1983 la Hidroeléctrica Chixoy, la más grande del país.

En 1992 inician sus operaciones varias generadoras privadas, entre ellas: Los Ingenios Azucareros, ENRON en Puerto Quetzal y posteriormente las plantas SIDEGUA, LAGOTEX, Secacao, Río Bobos, TAMPA, Guatemala Generating Group (GGG), Las Palmas, Generadora del Norte (GENOR), Calderas, Zunil, Poliwatt, Pasabién, Poza Verde, Tzululá, Cerro Vivo, Las Vacas y Matanzas.

En 1993 el INDE cubría la mayor parte de la generación del país con un 71 % y la distribución de energía al consumidor final, en casi todo el territorio. La Empresa Eléctrica de Guatemala S.A., propiedad mayoritaria del Estado, era la otra generadora y distribuidora importante, con el 80 % del consumo total del mercado. La EEGSA compraba el 67 % de la energía que requería directamente al INDE y el restante 23 % a otros generadores privados, que operaban en un mercado monopólico.

Las empresas distribuidoras estaban obligadas a comprar al INDE y los generadores no podían competir entre sí, y vendían solamente al INDE y a la EEGSA.

La red de transmisión estaba parcialmente abierta y limitaba las transacciones que pudieran hacerse en el mercado.

**1. El Proceso de Cambio.** El proceso se inicia en 1993, con la suscripción de los denominados contratos a término de venta de energía, entre generadores privados, el INDE y la EEGSA. Sin embargo, esta situación no promovía la competencia y solamente trataba de superar la deficiencia existente en el suministro de energía que vivía el país.

Faltaba entonces el marco legal que estableciera las normas y el mercado de competencia, que incentivara la participación de otros agentes con la debida certeza jurídica.

En el año 1996 se aprueba la nueva legislación del mercado eléctrico en Guatemala.

#### **B. Funcionamiento de la oferta y demanda de la red nacional**

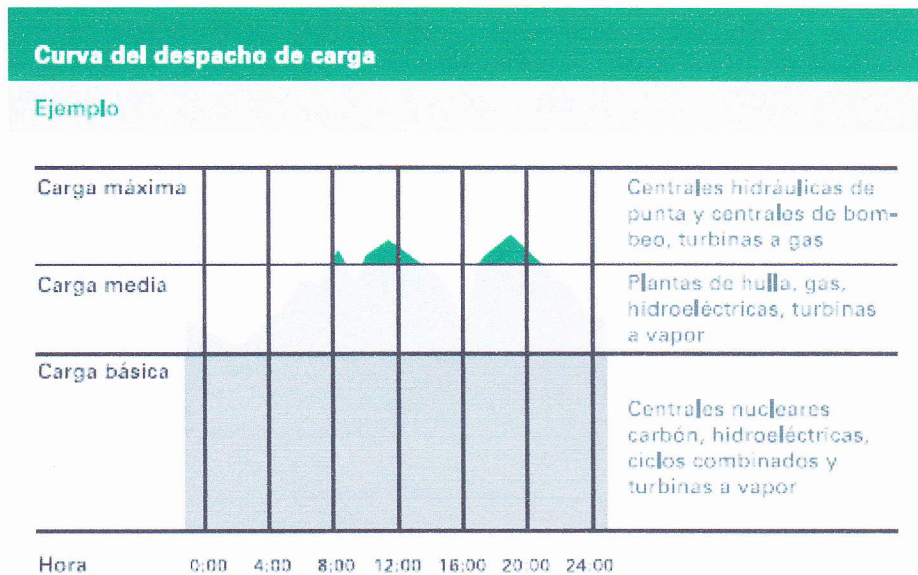
El diagrama muestra la gran variación en la demanda de electricidad en el transcurso de un día. Puesto que la energía eléctrica debe ser generada en el momento en el que se la necesita, la relación fluctuante entre oferta y demanda se equilibra con la entrada o salida de funcionamiento de las distintas centrales.

Para cada hora del día, dependiendo de la demanda requerida son puestas en funcionamiento distintos tipos de máquinas generadoras, las que son convocadas de acuerdo a su costo de producción.

Durante los últimos años aumentó sustancialmente la importancia de las plantas hidroeléctricas con embalse y las de acumulación por bombeo. Estas últimas aprovechan la energía sobrante, generalmente durante la noche, para bombear agua de un embalse inferior a uno superior y así aprovechar su energía potencial.

Para enfrentar las variaciones energéticas que supone estos sistemas interconectados, estas centrales deben enviar a la red la energía requerida en pocos segundos.

Gráfica 1: Curva del despacho de carga



Fuente: INDE

### C. Tipo de centrales hidroeléctricas

#### 1. Según su régimen de flujo

a. **Central hidroeléctrica a filo de agua.** Una central de pasada es aquella en la que no existe una acumulación apreciable de agua corriente arriba de las turbinas. El agua es filtrada por unas rejillas para proteger las turbinas, las cuales giran al recibir el agua. Esta rotación es transmitida al generador por un eje. Un sistema de regulación se ubica en la sala de control. En una central de este tipo las turbinas deben aceptar todo el caudal disponible del río “como viene”, con sus variaciones de estación en estación.

Movimiento perpetuo por la corriente del río: las centrales de pasada son el tipo más común de central construida sobre ríos y canales. Para generar electricidad aprovechan el desnivel entre la cabecera del río y la salida de agua.

Usualmente tienen pequeñas caídas y grandes caudales y generalmente son construidas formando presa sobre el cauce de los ríos, con el objetivo de mantener un



desnivel constante en el caudal de agua. Se sitúan en los lugares en que la energía hidráulica ha de emplearse en el momento mismo que se tiene disposición de ella, con el fin de accionar las turbinas.

El caudal suministrado varía dependiendo de las estaciones del año. Cuando las precipitaciones son abundantes (temporada de aguas altas), estas centrales producen su máxima potencia y el agua excedente sigue de largo.

En la temporada de aguas bajas, cuando el tiempo es seco, la potencia desarrollada disminuye notablemente. En ocasiones se construye un embalse relativamente pequeño para impedir pérdidas por rebose, y al mismo tiempo permitir una mayor producción de potencia y de energía. En general se obtiene de ellas una potencia instalada mayor a la de las centrales sin embalse.

**b. Central hidroeléctrica con embalse de reserva.** En este tipo de proyecto se embalsa un volumen considerable de líquido "aguas arriba" de las turbinas mediante la construcción de una o más presas que forman lagos artificiales.

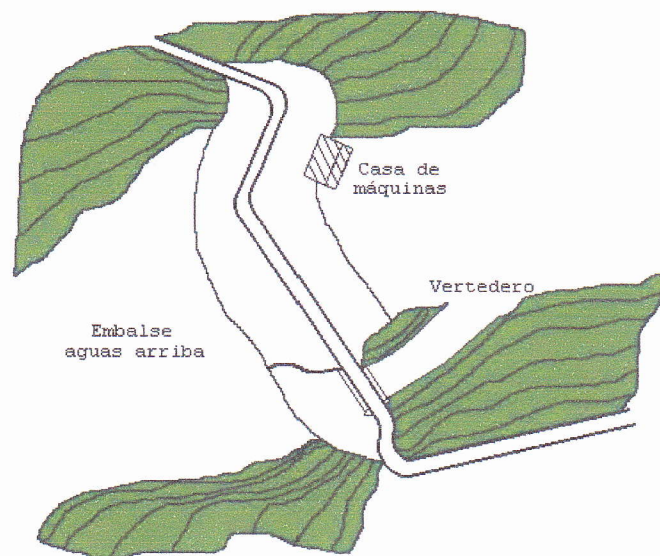
El embalse permite graduar la cantidad de agua que pasa por las turbinas. Del volumen embalsado depende la cantidad que puede hacerse pasar por las turbinas. Con embalse de reserva puede producirse energía eléctrica durante todo el año aunque el río se seque por completo durante algunos meses, cosa que sería imposible en un proyecto de pasada.

Las centrales con almacenamiento de reserva exigen por lo general una inversión de capital mayor que las de pasada, pero en la mayoría de los casos permiten usar toda la energía posible y producir kilovatios-hora más baratos.

Pueden existir dos variantes de estas centrales hidroeléctricas:

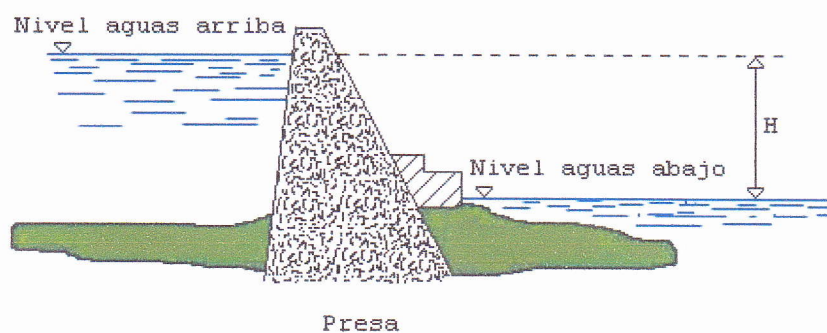
- 1) **Casa de máquinas al pie de la presa.** En las figuras siguientes observamos en planta y perfil el esquema de una central de este tipo:

Figura 1: Planta de embalse con cuarto de máquinas al pie de la presa



Fuente: [www.profesorenlinea.cl/.../CentralesHidroelectricas.htm](http://www.profesorenlinea.cl/.../CentralesHidroelectricas.htm)

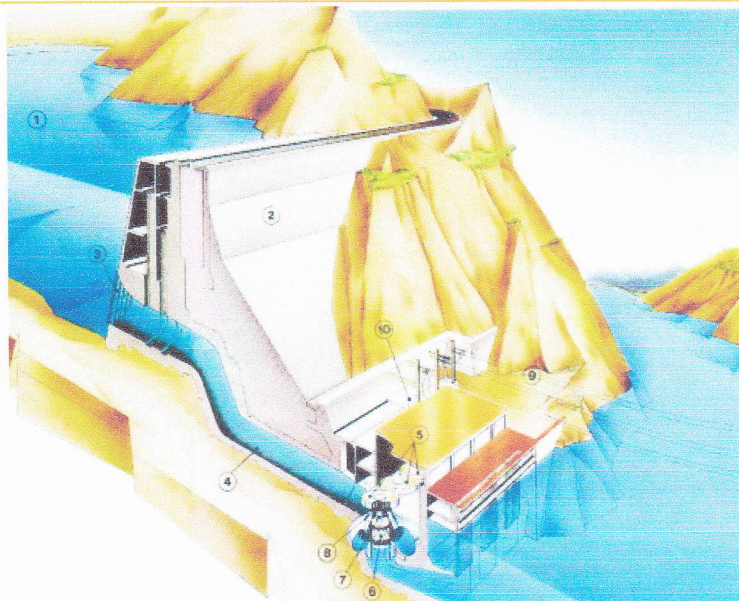
Figura 2: Perfil de embalse con cuarto de máquinas al pie de la presa



Fuente: [www.profesorenlinea.cl/.../CentralesHidroelectricas.htm](http://www.profesorenlinea.cl/.../CentralesHidroelectricas.htm)

La casa de máquinas suele estar al pie de la presa, como ilustra el dibujo, en estos tipos de central, el desnivel obtenido es de carácter mediano.

Figura 3: Esquema de embalse con cuarto de máquinas al pie de la presa  
Una central hidroeléctrica con la casa de máquinas al pie de la presa

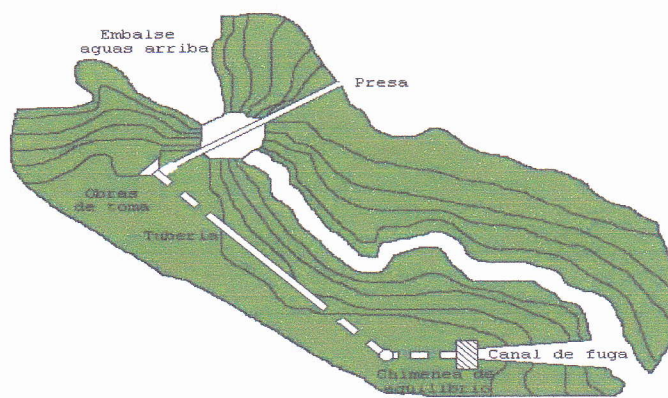


1. Agua embalsada, 2. Presa, 3. Rejillas filtradoras, 4. Tubería forzada, 5. Conjunto turbina-alternador, 6. Turbina, 7. Eje, 8. Generador, 9. Líneas de transporte de energía eléctrica, 10. Transformadores

Fuente: [www.profesorenlinea.cl/.../CentralesHidroelectricas.htm](http://www.profesorenlinea.cl/.../CentralesHidroelectricas.htm)

2) **Aprovechamiento por derivación del agua.** En las figuras siguientes tenemos un esquema en planta y perfil de una central de este tipo:

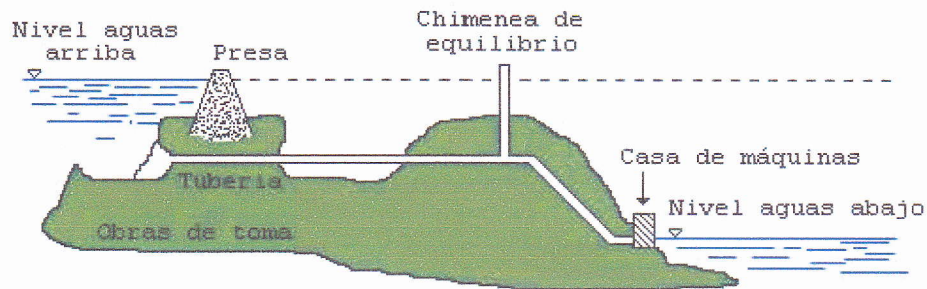
Figura 4: Planta de aprovechamiento por derivación



Fuente: [www.profesorenlinea.cl/.../CentralesHidroelectricas.htm](http://www.profesorenlinea.cl/.../CentralesHidroelectricas.htm)



Figura 5: Perfil de aprovechamiento por derivación



Fuente: [www.profesorenlinea.cl/.../CentralesHidroelectricas.htm](http://www.profesorenlinea.cl/.../CentralesHidroelectricas.htm)

En el lugar apropiado por la topografía del terreno, se ubica la obra de toma de agua, y el líquido se lleva por medio de canales, o tuberías de presión, hasta las proximidades de la casa de máquinas.

Allí se instala la chimenea de equilibrio, a partir de la cual la conducción tiene un declive más pronunciado, para ingresar finalmente a la casa de máquinas.

La chimenea de equilibrio es un conducto vertical que asegura al cerrar las válvulas de la central, que la energía cinética que tiene el agua en la conducción, se libere en ese elemento como un aumento de nivel y se transforme en energía potencial.

Los desniveles en este tipo de central suelen ser mayores comparados con los que se encuentran en los tipos anteriores de centrales.

**c. Central hidroeléctrica por bombeo.** Las centrales de bombeo son un tipo especial de centrales hidroeléctricas que posibilitan un empleo más racional de los recursos hidráulicos de un país.

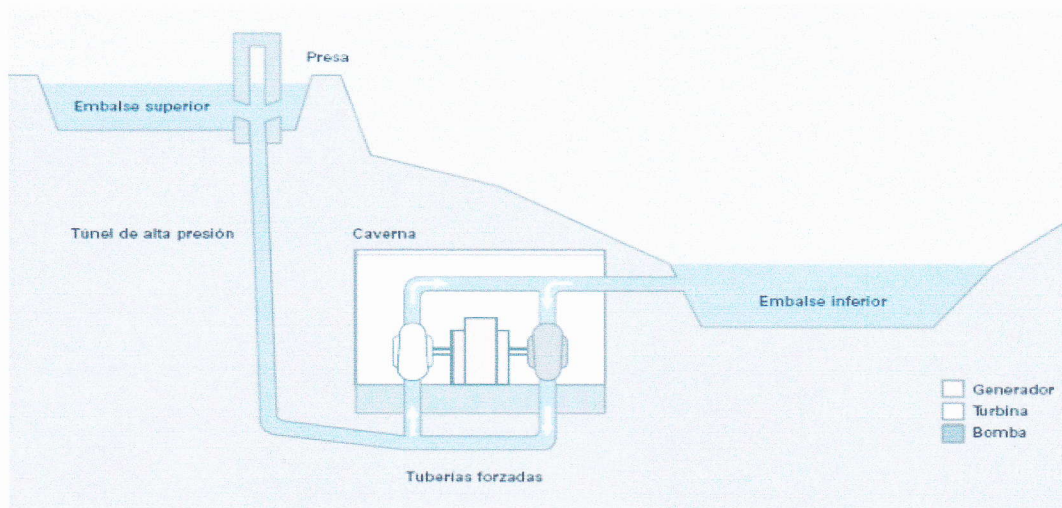
Disponen de dos embalses situados a diferente nivel. Cuando la demanda de energía eléctrica alcanza su máximo nivel a lo largo del día, las centrales de bombeo funcionan como una central convencional generando energía.

Al caer el agua, almacenada en el embalse superior, hace girar el rodete de la turbina asociada a un alternador.

Después el agua queda almacenada en el embalse inferior. Durante las horas del día en la que la demanda de energía es menor el agua es bombeada al embalse superior para que pueda hacer el ciclo productivo nuevamente.

Para ello la central dispone de grupos de motores-bomba o, alternativamente, sus turbinas son reversibles de manera que puedan funcionar como bombas y los alternadores como motores.

Figura 6: Hidroeléctrica de bombeo



Fuente: [thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/.../capitulo3.html](http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/.../capitulo3.html)

## 2. Clasificación

### a. Según la potencia instalada

Tabla 1: Tipo de central según la potencia instalada

Potencia (KW)	Tipo
0 – 50	Micro Central
50 – 500	Mini Central
500 – 5000	Pequeña Central

Fuente: INDE



### b. Según la caída

Tabla 2: Tipo de central según la caída

	Baja (m)	Media (m)	Alta (m)
Micro	$H < 15$	$15 < H < 50$	$H > 50$
Mini	$H < 20$	$20 < H < 100$	$H > 100$
Pequeña	$H < 25$	$25 < H < 130$	$H > 130$

Fuente: INDE

### D. Antecedentes hidrológicos

**1. Balance hídrico.** El agua, aunque se encuentra en un movimiento cíclico continuo, es cuantificable y debido a los requerimientos actuales del hombre, es necesario conocer con exactitud ese movimiento y definirlo, para aprovechar de forma racional los recursos hídricos y que no se modifiquen de forma irreversible, los componentes que intervienen en el ciclo del agua.

El establecimiento del balance hídrico en una cuenca o en una región determinada permite obtener información sobre:

- El volumen anual de escurrimiento o excedentes.
- El período en el que se produce el excedente y por tanto la infiltración o recarga del acuífero.
- Período en el que se produce un déficit de agua o sequía y el cálculo de demanda de agua para riego en ese período.

El establecimiento de un balance supone la medición de flujos de agua (caudales) y almacenamientos de la misma (niveles). Se pueden establecer balances de forma general, incluyendo aguas superficiales y subterráneas y parciales de sólo aguas superficiales, de un acuífero, del agua del suelo, etc. En cualquier caso, a la hora de establecer el balance se examinarán las entradas y las salidas al sistema analizado.

La propia idea de balance supone la medida independiente de los términos que intervienen en la ecuación de balance. Como toda medida física, está sujeta a error,

que, en algunos casos es grande debido a diversas circunstancias. Por ello se tiene que tener gran prudencia a la hora de obtener datos del balance.

Por medio de las precipitaciones atmosféricas (P), llega agua a la superficie de la Tierra. Parte de estas precipitaciones se evapora en contacto con el aire o es absorbida por las plantas y después transpirada por las mismas, fenómenos que denominaremos de forma general como evapotranspiración (E). El agua entonces sigue dos caminos: una parte fluye por la superficie de la corteza terrestre y otra parte se infiltra en el terreno. El agua de infiltración aún puede ser captada por el suelo y las plantas, sufriendo entonces fenómenos de evapotranspiración o puede circular hipodérmicamente junto con las aguas que circulan en superficie, denominándose el conjunto aguas de escurrimiento (R). La parte de agua infiltrada que alcanza una zona más profunda constituye la verdadera agua de infiltración (I) que se junta con las aguas subterráneas alimentando el acuífero.

La Ecuación de Continuidad se basa en que la diferencia que se produce entre las entradas y las salidas de agua se traduce en el agua que queda almacenada.

Entradas - Salidas = Variación del Almacenamiento

Aplicando estos conceptos, se expresa la precipitación como:

$$P = E + R + I + e$$

Siendo e el error cometido en las estimaciones o error de cierre, E la evapotranspiración, R el escurrimiento e I la infiltración.

De modo más concreto se puede describir la ecuación de forma que abarque todas las fuentes y sumideros de la zona en estudio de la siguiente forma:

$$e = P + Q_{se} + Q_{te} - E - Q_{ss} - Q_{ts} - \Delta S$$

Donde:

e = error de cierre

P = aportación pluviométrica

$Q_{se}$  = caudal superficial entrante

$Q_{te}$  = caudal subterráneo entrante

$E$  = evapotranspiración real

$Q_{ss}$  = caudal de superficie saliente

$Q_{ts}$  = caudal subterráneo saliente

$\Delta S$  = variación del almacenamiento (final - inicial). En condiciones ideales de medida debe ser igual al error de cierre.

La  $E$  (evapotranspiración) se calcula mediante el balance hídrico o mediante fórmulas empíricas (de Coutagne, de Turc, de Makkink, etc) o directamente mediante evapotranspirómetros. En cada caso, según el mecanismo de recarga y descarga del acuífero en estudio y del intervalo de tiempo seleccionado para plantear el balance, cada uno de los términos de la ecuación podrá o no aparecer. Por ejemplo, si se trata de un acuífero limitado totalmente por fronteras impermeables, los términos  $Q_{te}$  y  $Q_{ts}$  no aparecerán, ya que no existe entrada ni salida por flujo subterráneo.

Si se trata de un solo acuífero que no tiene descarga por evapotranspiración ni por afloramientos, los términos  $Q_{ss}$  y  $E$  serán suprimidos de la ecuación. Por otra parte, la ecuación de balance para un mismo acuífero podrá variar de un intervalo de tiempo a otro. En todos los casos, es necesario tener una idea más o menos clara del comportamiento del acuífero para plantear su ecuación de balance.

El área utilizada para efectuar el balance de agua subterránea depende de varios factores: por una parte, lo ideal sería efectuar el balance para todo el acuífero (valle, planicie) a fin de conocer su potencialidad total; sin embargo, esto no siempre es posible, debido a que la aplicación del balance requiere del conocimiento del comportamiento del acuífero observado en pozos los cuales no siempre se encuentran distribuidos en toda el área, sino sólo en una porción de la misma. Por consiguiente, en muchas ocasiones el área de balance tiene que limitarse al área con datos disponibles.



El área de balance puede estar limitada por fronteras reales, geométricas e hidrológicas, tales como afloramientos o masas de agua (mar, lagos, etc), y por fronteras virtuales, imaginarias.

Para realizar un balance hídrico lo principal es la adquisición de datos, por lo cual se requiere que ésta se haga de la forma más precisa posible.

Se deben recoger datos de (Figura 7):

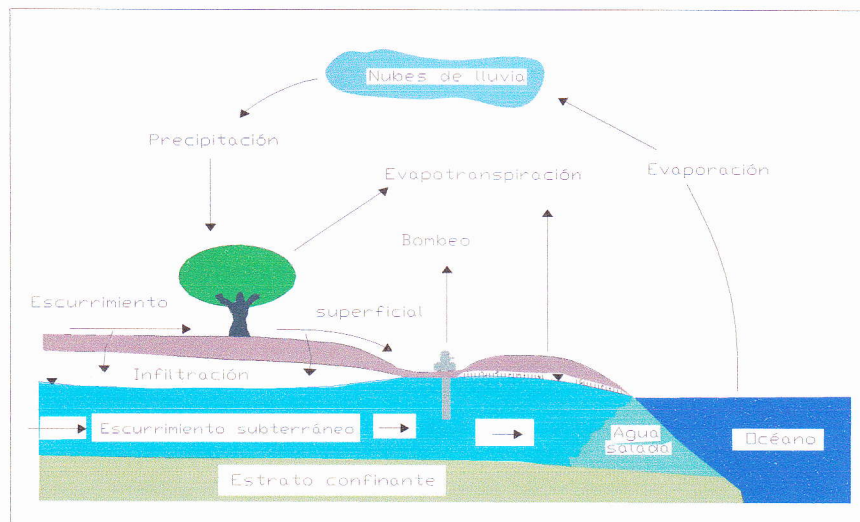
Precipitación (P): Se mide por la altura que alcanzaría sobre una superficie plana y horizontal, antes de sufrir pérdidas. Para determinarla se usan los pluviómetros y la unidad de precipitación es el milímetro de altura (1 mm).

Evapotranspiración (ET): Se determina mediante cálculos basados en la temperatura y humedad de la atmósfera y del suelo.

Escorrentía superficial o directa (ED): Se determina por aforos de cursos fluviales.

Escorrentía subterránea o base (ES): Se calcula por diferencia, una vez conocidos los demás términos del balance hídrico, o por cálculos y experiencias basados en la porosidad y permeabilidad de diferentes rocas.

Figura 7. Términos del balance hídrico



Fuente: Varias



**2. Evapotranspiración.** La evapotranspiración es esencialmente igual a la evaporación, excepto que la superficie de la cual se escapan las moléculas de agua no es una superficie de agua, sino hojas de plantas.

La cantidad de vapor de agua que transpira una planta, varía día a día con los factores ambientales que actúan sobre las condiciones fisiológicas del vegetal y determinan la rapidez con que el vapor del agua se desprende de la planta, siendo los principales:

- Radiación solar
- Humedad relativa
- Temperatura
- Viento

**3. Radiación solar.** Este término comprende la luz visible y otras formas de energía radiante (radiaciones infrarrojas y ultravioleta). El principal efecto de las radiaciones solares sobre la evapotranspiración proviene de la influencia de la luz sobre la apertura y cierre de los estomas, ya que en la mayoría de las especies vegetales, los estomas por lo común, permanecen cerrados cuando desaparece la luz.

**4. Humedad relativa.** En general si otros factores permanecen constantes, cuando la presión del vapor es mayor, será más lenta la evapotranspiración. Si los estomas están cubiertos, la difusión del vapor de agua de las hojas dependerá de la diferencia entre la presión de vapor de agua en los espacios intercelulares y la presión de vapor de la atmósfera exterior.

5. **Temperatura.** Influye en la velocidad en que se difunde el vapor de agua de las hojas a través de los estomas, en general cuanto más alta es la temperatura para un gradiente dado, más alta es la velocidad de difusión.

6. **Viento.** El efecto del viento sobre la evapotranspiración dependerá de las condiciones ambientales. Un aumento en la velocidad del viento, dentro de ciertos límites significa una mayor evapotranspiración, sin embargo, puede decirse que la evapotranspiración aumenta relativamente más, por los efectos de una brisa suave (0 a 3 km/hora), que por vientos de gran velocidad. Se ha observado que estos últimos ejercen más bien un efecto retardante sobre la evapotranspiración, probablemente debido al cierre de los estomas en tales condiciones. El efecto del viento puede ser indirecto sobre la evapotranspiración a través de la influencia que ejercen en la temperatura de las hojas.

7. **Métodos para determinar la evapotranspiración.** Los métodos pueden clasificarse en métodos directos e indirectos. Los primeros proporcionan directamente el consumo total del agua requerida, utilizando para ello aparatos e instrumentos para su determinación. Los segundos en forma indirecta y bajo la utilización de fórmulas empíricas, obtienen los consumos de agua a través de todo el ciclo vegetativo de la planta.

a. **Métodos directos.** Miden directamente los consumos por evaporación y requieren para su determinación la instalación de aparatos, el cuidado de ellos y seguir la metodología específica en cada paso. Son aplicables para zonas donde se tiene una agricultura establecida, ya que proporcionan valores mucho más apegados a la realidad y sirven a la vez para ajustar los parámetros de los métodos empíricos. Los métodos más utilizados son: el del lisímetro, del evapotranspirómetro de Thornthwaite, los atmómetros y el método gravimétrico.

**1) Método del lisímetro.** Determina la evapotranspiración potencial y consiste en un recipiente de lámina galvanizada formado por un tanque cilíndrico de más o menos 6 m de diámetro por 95 cm de alto, en el que se coloca el suelo y el cultivo en estudio. El consumo de agua por evapotranspiración se determina pesando diariamente el conjunto del suelo, plantas, agua y aparato, y por diferencia de pesos se obtiene la humedad consumida. La reposición de agua se efectúa por medio de tanques de alimentación en forma automática.

Puede mencionarse como ventaja la facilidad de las mediciones y de la aplicación del agua; pero a su vez estos aparatos aunque fáciles de manejar, son más caros. Entre las desventajas se encuentran sus altos costos, que pueden alterar las condiciones normales del suelo afectando la medición, provocan un desarrollo anormal de las raíces que se concentran hacia el tubo de aplicación del agua, por haber más humedad en el fondo o base del recipiente y no se pueden aplicar a plantas que tengan un sistema radicular mayor que las dimensiones del tanque que contiene el suelo.

**2) Evapotranspirómetro de Thornthwaite.** Consta de las siguientes partes:

Tanque evapotranspirador de hierro galvanizado, con área rectangular de 4 m<sup>2</sup> y 90 cm de profundidad. Este tanque va hundido hasta el nivel del suelo. Se llena de tierra y se siembran las plantas. En el fondo tiene un lecho de grava que ayuda a eliminar el exceso de agua.

Tubería subterránea ramificada y perforada para conducir el agua al suelo.

Tanque alimentador en donde se mide y agrega diariamente el agua consumida

Tanque regulador en donde se mide y agrega diariamente el agua consumida.

Tanque de excedentes, que recoge los excesos de agua, generalmente provocados por lluvias.



Junto a los tanques de excedentes y de alimentación se colocan higrómetros que permiten tener las medidas exactas del agua.

Tubería que conecta a todo el sistema.

La cantidad de agua consumida ( $U_c$ ) será la que se agrega al tanque alimentador ( $v_a$ ) más la lluvia ( $v_{ll}$ ), menos la cantidad medida en el tanque de excedentes ( $v_e$ ).

$$U_c = v_a + v_{ll} - v_e$$

Para el buen funcionamiento del aparato se recomienda que los tanques alimentador, regulador y de excedentes, estén bajo una caseta, para disminuir los efectos de evaporación, además alrededor del tanque evapotranspirador, deberá estar sembrado el cultivo que está en estudio.

Las dificultades que presenta la operación del equipo, el hecho de no poder aplicarse a más de un solo cultivo, hacen que su utilización sea altamente costosa.

### **3) Atmómetro de Livingstone.**

Está formado por una esfera de cerámica porosa, que tiene un vástago barnizado del mismo material que se introduce dentro de un recipiente graduado que contiene agua; la esfera se encuentra pintada de blanco o de negro. Al recibir energía de la atmósfera, se produce una evaporación en la superficie de la esfera que se traduce en una succión en el depósito graduado, el cual mide la cantidad de agua evaporada.

Se ha visto que existe mayor correlación entre la evapotranspiración y las lecturas de los atmómetros si se utilizan dos, uno negro y otro blanco. El valor se obtiene con la diferencia de lecturas.

**4) Método gravimétrico.** Se basa en la determinación en los diferentes valores de humedad registrados en una serie de mediciones de peso que se



efectúan a través del ciclo vegetativo, en muestras de suelo, obtenidas a una profundidad igual a la que tienen las raíces de las plantas del cultivo considerado.

En función de estas diferencias y de las características del suelo, se obtienen las láminas de agua consumidas por evaporación, en un periodo de tiempo determinado.

La suma total de las láminas consumidas en los intervalos entre riegos, es igual a la "lámina total consumida" o "uso consuntivo" del cultivo estudiado.

**b. Algunos métodos indirectos o empíricos usados comúnmente.** Los métodos más comunes para estimar la evapotranspiración son:

Thornthwaite

Turc

Blaney y Criddle

Racional utilizando la curva de Hansen

Grassi y Christensen

Tanque evaporímetro tipo A

Penman simplificado

La mayor parte de ellos son demasiado teóricos ya que han sido deducidos bajo condiciones definidas entre regiones y su aplicación precisa de una serie de datos que generalmente no se tienen a la disposición. El método de Thornthwaite calcula la evapotranspiración potencial mediante los datos existentes de las temperaturas medias mensuales, el de Turc utiliza la precipitación y temperatura medias de una cuenca, y los de Blaney y Criddle y Grassi y Christensen hacen uso de la radiación solar.

**1) Método de Thornthwaite.** La fórmula se basa en la temperatura y en la latitud determinando que esta última constituye un buen índice

de la energía en un lugar específico. Sirve para estimar la evapotranspiración potencial y tiene la ventaja de que la fórmula usa datos climatológicos accesibles. Se obtienen buenos resultados en zonas húmedas con vegetación abundante. Su expresión general es:

$$Et = 1.6 \left( \frac{10T}{I} \right)^a$$

Donde:

Et = evaporación potencial no ajustada para meses de 30 días de 12 horas luz (mm)

T = temperatura media mensual (°C)

a = constante que depende del lugar y que es función del índice de eficiencia anual de temperatura, cuyo valor es:

$$a = 0.000000675 I^3 - 0.0000771 I^2 + 0.017925 I + 0.49239$$

i = eficiencia de la temperatura

I = índice anual de calor (o temperatura). Es la suma de las eficiencias mensuales de temperatura.

$$I = \sum_{12}^1 i$$

$$I = \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

La evapotranspiración potencial no ajustada se corrige por la duración real del día en horas y los días del mes y se obtiene la evapotranspiración potencial ajustada.

Las críticas que pueden hacerse a este método son:

La temperatura no es buena indicadora de la energía disponible para la evapotranspiración.

La temperatura del aire respecto a la temperatura de radiación puede ser diferente.

La evaporación puede cesar cuando la temperatura promedio desciende de cero grados centígrados, lo cual es falso.

El viento puede ser un factor importante en algunas áreas requiriéndose en ocasiones para ello, un factor de corrección.

La fórmula no toma en cuenta el efecto de calentamiento o enfriamiento del aire por advección.

Se obtienen resultados aceptables en zonas húmedas con vegetación abundante, pero los errores aumentan en zonas áridas o semiáridas.

**2) Método de Turc.** Turc desarrolló la fórmula siguiente la cual se basa en estudios estadísticos de 254 cuencas alrededor del mundo; relaciona evapotranspiración, precipitación y temperatura. También, desarrolló otra fórmula mucho más complicada para periodos más pequeños (10 días); en esta fórmula trata de tomar en cuenta el efecto de la humedad del suelo para diferentes plantas.

$$ET_{real} = \frac{P}{[0.9 + (P/I_T)^2]^{1/2}}$$

Donde:

$ET_{real}$  = evapotranspiración anual (mm)

P = precipitación anual (mm)

$I_T$  =  $300 + 25 T + 0.05 T^3$

T = temperatura media del aire (°C)

Ejemplo de un estudio de caso: Cuenca del Río Mátape

Se obtuvo una precipitación promedio de 250 mm/año y una temperatura del aire promedio anual de 35°C para la Cuenca del Río Mátape en Sonora central. Se obtuvo la evapotranspiración anual real por el Método de Turc.

Tabla 3: Ejemplo de evapotranspiración real de Turc  
De acuerdo a la ecuación propuesta por Turc:

$$E_T \text{ real} = P / (0.9 + (P / I_T)^2)^{1/2}$$

$$I_T = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

Usando los datos calculados previamente para la Cuenca del Mátape:

P = PRECIPITACIÓN ANUAL (mm)	T = TEMPERATURA AIRE (°C)	$I_T$	ET = EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (mm)
250	35	3,318.75	262.70

Fuente: Cuenca del Río Mátape

**3) Método de Blaney y Criddle.** Harry F. Blaney y Wayne D. Criddle lograron perfeccionar su fórmula en el oeste de los Estados Unidos, donde haciendo intervenir la temperatura media mensual y el porcentaje de horas-luz, así como un coeficiente que depende del cultivo se puede estimar el uso consuntivo.

$$U. C. = K F$$

Donde:

U. C. = uso consuntivo o evapotranspiración real (cm)

K = coeficiente de ajuste que depende de varios factores entre ellos, el tipo de cultivo, de la humedad a que está sujeta al suelo

$$F = \sum_l^n f$$



$$f = p \left( \frac{T + 17.8}{21.8} \right)$$

Donde:

n = número de meses que cubre el ciclo vegetativo del cultivo

f = factor climático

T = temperatura media mensual (°C)

p = porcentaje de horas-luz del mes, con respecto al total anual.

La fórmula propuesta relaciona la temperatura media de un lugar con la luminosidad y la evapotranspiración, eliminando la humedad relativa; determinando los coeficientes globales del cultivo.

Coeficiente de corrección "KT"

La fórmula reporta valores en algunos casos no específicos, por haber sido deducida en una región desértica, Penman introdujo una corrección por temperatura "KT", que se calcula como sigue:

$$KT = 0.031144 T + 0.2396$$

T = temperatura media mensual (°C)

Esta corrección se lleva a efecto solamente en zonas desérticas.

La expresión general de Blaney y Criddle, permite obtener valores del uso consuntivo en periodos no menores de 30 días, en virtud de que "K" es una constante que varía en función del desarrollo que permita obtener valores de U. C. en el periodo que se desee, por lo cual el factor "K" se transforma en "KD"; y por lo tanto la expresión final de la fórmula tal como se usa actualmente es la siguiente:

$$U. C. = KD \times KT \times f$$

Donde:

KD = coeficiente de desarrollo

Para poder aplicar esta fórmula es necesario tener las curvas que proporcionan los valores del coeficiente de desarrollo "KD", de cada cultivo, las cuales deben obtenerse en cada lugar y para cada cultivo o bien usar las obtenidas en lugares similares.

En la Tabla 4 se presentan una serie de valores de "KG", coeficientes globales de uso consuntivo, tomados de la tabla publicada en el boletín del Departamento de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América.

Tabla 4: Coeficientes globales usados en la fórmula de Blaney y Criddle

CULTIVO	REGIÓN HÚMEDA	REGIÓN ÁRIDA
Maíz	0.75	0.85
Trigo	0.75	0.75
Algodón	0.60	0.65
Sorgo	0.70	0.70
Cártamo	0.57	0.57
Soya	0.80	0.80
Arroz	1.00	1.20
Ajonjolí	0.70	0.75
Garbanzo	0.60	0.70
Cebada	0.75	0.75
Jitomate (vara)	0.70	0.70
Vid	0.70	0.65

Fuente: Varias

Al aplicarse la fórmula general el valor obtenido corresponde al uso consuntivo de todo el ciclo, sin que con esto se obtengan los diferentes valores parciales útiles para programar las láminas de agua y los intervalos de tiempo entre riegos.

$$E_t = F K$$

Donde:

$E_t$  = evapotranspiración potencial (mm)

F = sumatoria de los valores obtenidos multiplicando el factor  $\left(\frac{T + 17.8}{21.8}\right)$  de la Tabla 6 por "p", obtenido de la Tabla 6 de latitud y mes del año.

Tabla 5: Valores de la expresión  $\left(\frac{T + 17.8}{21.8}\right)$  en relación con temperaturas medias (°C)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
19	1.690	1.695	1.699	1.704	1.708	1.713	1.718	1.722	1.727	1.731
20	1.736	1.741	1.745	1.750	1.754	1.759	1.764	1.768	1.773	1.777
21	1.782	1.787	1.791	1.796	1.800	1.805	1.810	1.814	1.819	1.823
22	1.826	1.833	1.837	1.842	1.846	1.851	1.856	1.860	1.865	1.869
23	1.877	1.879	1.883	1.888	1.892	1.897	1.902	1.906	1.911	1.915
24	1.920	1.925	1.929	1.934	1.938	1.943	1.948	1.952	1.957	1.961
25	1.966	1.971	1.975	1.980	1.984	1.989	1.994	1.998	2.003	2.007
26	2.012	2.017	2.021	2.026	2.030	2.035	2.040	2.044	2.049	2.053
27	2.058	2.063	2.067	2.072	2.076	2.081	2.086	2.090	2.095	2.099
28	2.104	2.109	2.113	2.118	2.122	2.127	2.132	2.136	2.141	2.145
29	2.150	2.155	2.159	2.164	2.168	2.173	2.178	2.182	2.187	2.191
30	2.196	2.201	2.205	2.210	2.214	2.219	2.224	2.228	2.233	2.237
31	2.242	2.247	2.251	2.256	2.260	2.265	2.270	2.274	2.279	2.283
32	2.288	2.293	2.297	2.302	2.306	2.311	2.316	2.320	2.325	2.329
33	2.334	2.339	2.343	2.348	2.352	2.357	2.362	2.366	2.371	2.375
34	2.380	2.385	2.389	2.394	2.398	2.403	2.408	2.412	2.417	2.421
35	2.426	2.431	2.431	2.436	2.440	2.445	2.450	2.424	2.459	2.463

Fuente: Varias



Tabla 6: Valor de “p” según la latitud y el mes

Lat. Norte	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
20°	7.74	7.26	8.41	8.53	9.14	9.00	9.23	8.95	8.29	8.17	7.59	7.66
21°	7.71	7.24	8.40	8.54	9.18	9.05	9.29	8.98	8.29	8.15	7.54	7.62
22°	7.66	7.21	8.40	8.56	9.92	9.09	9.33	9.00	8.30	8.13	7.50	7.55
23°	7.62	7.19	8.40	8.57	9.24	9.12	9.35	9.02	8.30	8.11	7.47	7.50
24°	7.58	7.17	8.40	8.60	9.30	9.20	9.41	9.05	8.31	8.09	7.43	7.46
25°	7.53	7.13	8.30	8.61	9.32	9.22	9.43	9.08	8.30	8.08	7.40	7.41
26°	7.49	7.12	8.40	8.64	9.38	9.30	9.49	9.10	8.31	8.06	7.36	7.35
27°	7.43	7.09	8.38	8.65	9.40	9.32	9.52	9.13	8.32	8.03	7.36	7.31
28°	7.40	7.07	8.30	9.68	9.46	9.38	9.58	9.16	8.32	8.02	7.22	7.27
29°	7.35	7.04	8.37	8.70	9.49	9.43	9.61	9.19	8.32	8.00	7.24	7.20
30°	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.34	7.99	7.19	7.14
31°	7.25	7.00	8.36	8.73	9.57	9.54	9.72	9.24	8.33	7.95	7.15	7.09
32°	7.20	6.97	8.37	8.75	9.63	9.60	9.77	9.28	8.34	7.95	7.11	7.05

Fuente: Varias

Mientras no se cuente con gráficas de la región, el cálculo de los valores parciales se hace con las gráficas elaboradas por el Departamento de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América, en la región del centro de California, que permiten obtener los coeficientes, en función del desarrollo de las plantas, dividiendo en porcentajes el tiempo del ciclo total desde el nacimiento de las mismas, hasta la cosecha.

Se sugiere la siguiente metodología para el cálculo de la evapotranspiración real utilizando los coeficientes de desarrollo, determinados de las gráficas específicas del cultivo considerado:

Obtener en cada uno de los meses el factor “f” de Blaney y Criddle, que es el producto de los factores “p”, por ciento teórico de horas-luz en función de la latitud y el mes, por el valor de la expresión:

$$\left( \frac{T + 17.8}{21.8} \right)$$

Determinar y calcular los valores de Kc o sea, los coeficientes de la etapa de desarrollo en la gráfica de cultivo, para lo cual es necesario seleccionar el tramo de



Coeficiente de ajuste "J"

Aunque el método de Blaney y Criddle y sus coeficientes por cultivo han sido usados en diferentes partes del mundo con relativa aproximación, estos valores deben estar ajustados cada vez que se tengan referencias experimentales confiables.

$$J = K_g / K_c$$

**4) Método racional utilizando la curva de Hansen.** Todas las plantas cultivadas presentan etapas de crecimiento, floración y fructificación. Este método se basa en que las exigencias de humedad a través del ciclo vegetativo se conjugan en una sola curva determinada como promedio de todas las demás. Las etapas de crecimiento están relacionadas con las demandas de agua aún más estrechamente, que la edad misma de los cultivos.

Este método tiene las siguientes ventajas:

Reúne en una sola curva la información sobre las exigencias relativas de humedad de un cultivo a través de un ciclo vegetativo, eliminando así la necesidad de usar diferentes curvas para calcular los usos consuntivos.

El factor climático "f" puede ser utilizado ventajosamente por el dato de evaporación de cada distrito afinando dicho coeficiente con los estudios de control gravimétrico de humedad.

El coeficiente de requerimiento de humedad puede ser mejor adaptado a las condiciones de cada distrito afinando dicho coeficiente con los estudios de control gravimétrico de humedad del suelo, que se hayan realizado en las parcelas de prueba para diferentes cultivos y determinando en cada caso, los porcentos de hora- luz de cada distrito o área por regar.

El procedimiento de cálculo exige usar el siguiente camino:

Obtener para cada mes el factor "f" de Blaney y Criddle.

Definir el punto que limita el desarrollo de longitud de la curva según el cultivo propuesto por Hansen.

Precisar en décimas el tramo de la curva sobre el eje de las abscisas, el cual se divide en el número de meses que forman el ciclo vegetativo.

Determinese el coeficiente de la etapa de desarrollo del cultivo ( $K_c$ ) de la curva única de Hansen.

El valor de la coordenada media se obtiene en igual forma que en el método anterior.

Formación de la curva de los consumos acumulados y frecuencias de los riegos.

Obtenidas las láminas que se consumirán mensualmente se procede a la formación de la curva de consumos acumulados y se determinan las frecuencias con que deben aplicarse los diferentes riegos, mediante el siguiente proceso:

Se traza un sistema de ejes coordenados y coloque en el eje de las ordenadas una escala en centímetros que represente las láminas de agua acumuladas en cm, y en el eje de las abscisas el tiempo en días que dura el ciclo vegetativo del cultivo.

Se fija en la gráfica los valores de los consumos mensuales en forma acumulativa.

Las "láminas de agua de riego" requeridas para reponer la humedad consumida entre riegos, en el espesor del suelo considerado para alojar el sistema radicular, deberá ser del mismo valor.

Se fija en la curva los valores de las diferentes láminas de agua de consumos acumulados y en cada uno de los puntos donde intersecta a la curva, se trazan paralelas al eje de las ordenadas hasta cortar el eje de las abscisas para fijar los diferentes intervalos en que deberán aplicarse los riegos.

**5) Método de Grassi y Christensen.** Este método calcula el uso consuntivo de igual forma que lo hacen Blaney y Criddle. Se determinan los factores

evaporantes (f), se multiplican por los coeficientes periódicos (km) que se obtienen de una gráfica con los valores propuestos por Grassi y Christensen, de la manera siguiente:

Se determina el coeficiente global (Kg) el cual dependerá del cultivo y de las características climáticas del lugar, ya que los valores para zonas húmedas y semi-húmedas son más bajos que para las zonas áridas y semi-áridas, según los valores de coeficientes globales propuestos por Blaney y Criddle (Tabla 4).

Una vez obtenido este valor, se va a la Tabla 7 con los coeficientes propuestos por Grassi y Christensen, y se toman los valores de los diferentes tantos por ciento del ciclo vegetativo correspondiente para el coeficiente global elegido.

Se elabora una gráfica tomando como abscisas los valores del por ciento del ciclo vegetativo y en las ordenadas los valores de los coeficientes periódicos (Km) de la Tabla 7.

Una vez construida la gráfica, se divide en partes iguales la distancia que comprende todo el ciclo vegetativo, como meses dure el cultivo desde la siembra a la cosecha.

Se levanta en cada división de la separación de meses en las abscisas, líneas perpendiculares hasta la curva. Las áreas delimitadas en la curva deberán ser igual al número de meses en que se haya dividido el ciclo vegetativo del cultivo.

Se localizan los centros de gravedad de estas áreas y se trazan por ellos paralelas al eje de las abscisas obteniéndose en el eje de las ordenadas el valor de Km para cada mes.

Finalmente el valor determinado se multiplica por los valores de los (f) mensuales correspondientes para obtener el valor del uso consuntivo de cada uno de ellos.



Tabla 7: Coeficientes periódicos de uso consuntivo en función del ciclo vegetativo

CICLO VEGETATIVO (%)	Kg = 0.35	Kg = 0.40	Kg = 0.45	Kg = 0.50	Kg = 0.55	Kg = 0.60	Kg = 0.65
	K	K	K	K	K	K	K
10	0.158	0.181	0.204	0.226	0.249	0.272	0.294
20	0.255	0.292	0.328	0.365	0.401	0.438	0.474
30	0.333	0.380	0.428	0.425	0.523	0.571	0.618
40	0.391	0.447	0.503	0.559	0.615	0.671	0.727
50	0.430	0.492	0.553	0.615	0.676	0.738	0.799
60	0.450	0.514	0.578	0.643	0.707	0.771	0.836
70	0.450	0.515	0.579	0.643	0.708	0.772	0.837
80	0.431	0.493	0.555	0.616	0.678	0.740	0.801
90	0.393	0.450	0.406	0.562	0.618	0.674	0.731
100	0.336	0.384	0.432	0.480	0.528	0.576	0.624

CICLO VEGETATIVO (%)	Kg = 0.70	Kg = 0.75	Kg = 0.80	Kg = 0.85	Kg = 0.90	Kg = 0.95
	K	K	K	K	K	K
10	0.317	0.340	0.362	0.385	0.407	0.430
20	0.511	0.547	0.584	0.620	0.657	0.693
30	0.666	0.713	0.761	0.809	0.856	0.904
40	0.783	0.839	0.895	0.951	1.006	1.063
50	0.861	0.922	0.984	1.045	1.107	1.168
60	0.900	0.964	1.028	1.093	1.157	1.221
70	0.901	0.965	1.030	1.094	1.158	1.222
80	0.863	0.925	0.986	1.048	1.109	1.171
90	0.787	0.843	0.899	0.956	1.012	1.068
100	0.672	0.720	0.768	0.816	0.864	0.912

Fuente: De la Peña (1987)

**6) Método usando un tanque evaporímetro tipo "A".** Se basa en la consideración propuesta por Grassi en la que estipula que las medidas de evaporación en una superficie de agua en un tanque evaporímetro integra los efectos de los diferentes factores meteorológicos que influyen en la evaporación.

Basado en esto, se puede estimar con cierta precisión la evapotranspiración de un cultivo utilizando la siguiente expresión:

$$Et_R = Et_p K_C$$



si consideramos que  $E_t = C E_v$  tenemos:

$$E_{tR} = C E_v K_C$$

Donde:

$E_{tR}$  = evapotranspiración real

$E_{tP}$  = evapotranspiración potencial

$C$  = coeficiente de ajuste de la evaporación por la posición del tanque, la intensidad del viento y por el porcentaje de la humedad relativa mensual sobre el tanque.

$E_v$  = evaporación media en tanque tipo A

$K_C$  = coeficiente de ajuste en función del desarrollo vegetativo del cultivo

El tanque tipo "A", es el más utilizado por el Servicio Meteorológico Nacional y estipula que las tinas tengan un diámetro de 1.22 m por 0.26 m de altura.

Su colocación está condicionada a ciertas normas que cubren la altura sobre el suelo fijándola a 0.50 m sobre la superficie del terreno sobre tablones de 4" x 4" cuyo tanque de aluminio deber ser pintado de color generalmente blanco, recomendándose no utilizar colores oscuros o negros.

Puede estar rodeado de pasto o en tierra seca. El nivel del agua dentro de la tina se debe conservar de 15 a 20 cm y teniendo cuidado de que no se formen en la superficie capas de nata que modifiquen el valor de la evaporación.

**7) Método de Penman simplificado.** Con este método puede obtenerse fácilmente la evaporación potencial diaria en mm/día, mediante el uso de un nomograma y tablas formadas en función de la radiación extraterrestre, la temperatura media del aire y el porcentaje de brillo solar. Para este porcentaje se calcula un valor esperado en la zona o se determina por medio de un piroheliógrafo (quemador de papel).

**8) Metodología para obtener la evapotranspiración potencial.** Se obtiene el valor de la radiación extraterrestre expresada en evaporación equivalente en mm/día de cada mes en atención a la latitud del lugar (Tabla 8).

Tabla 8: Radiación (Latitud Norte)

Mes	20	22	24	26	28	30	32	34
Enero	11.2	10.7	10.2	9.8	9.3	8.8	8.3	7.9
Febrero	12.7	12.3	11.9	11.5	11.1	10.7	10.2	9.8
Marzo	14.4	14.2	13.9	13.7	13.4	13.1	12.8	12.4
Abril	15.6	15.5	15.4	15.3	15.3	15.2	15.0	14.8
Mayo	16.3	16.3	16.4	16.4	16.5	16.5	16.5	16.5
Junio	16.4	16.4	16.6	16.7	16.8	17.0	17.0	17.1
Julio	16.3	16.4	16.5	16.6	16.7	16.8	16.8	16.8
Agosto	15.9	15.8	15.8	15.7	15.7	15.7	15.6	15.5
Septiembre	14.8	14.6	14.6	14.3	14.1	13.9	13.6	13.4
Octubre	13.3	13.0	12.6	12.3	12.0	11.6	11.2	10.8
Noviembre	11.6	11.1	10.7	10.3	9.9	9.9	9.0	8.5
Diciembre	10.7	10.2	9.7	9.3	8.8	8.3	7.8	7.2

Fuente: "Guidelines for predicting crop water requirements" por J. Doorenbos y W. O. Pruitt Fao Roma, 1975.

Se calcula el porcentaje de brillo solar del lugar mediante la relación del vapor del brillo solar, según el reporte medio mensual obtenido en el piroheliógrafo instalado y el valor del brillo solar esperado en cada uno de los meses dados en la Tabla 9.

Tabla 9: Porcentaje de brillo solar (Latitud Norte)

Mes	20	25	30	35
Enero	11.0	10.7	10.4	10.1
Febrero	11.5	11.3	11.1	11.0
Marzo	12.0	12.0	12.0	11.9
Abril	12.6	12.7	12.9	13.1
Mayo	13.1	13.3	13.6	14.0
Junio	13.3	13.7	14.0	14.5
Julio	13.2	13.5	13.9	14.3
Agosto	12.8	13.0	13.2	13.5
Septiembre	2.3	12.3	12.4	12.4
Octubre	1.8	11.6	11.5	11.2
Noviembre	1.2	10.9	10.6	10.3
Diciembre	10.9	10.6	10.2	9.8

Fuente: "Guidelines for predicting crop water requirements" por J. Doorenbos y W. O. Pruitt Fao Roma, 1975.

Para encontrar el valor de la evapotranspiración potencial en el nomograma, se traza una línea que una el punto que representa al valor de la radiación extraterrestre expresada en evaporación equivalente en mm/día con el punto de la escala donde está el valor del porcentaje de brillo solar, prolongándola hasta la escala pivote, cuyo cruce determinará el siguiente trazo.

Del punto base de la escala pivote, se traza una línea que una el valor obtenido en la línea pivote con el valor de la temperatura media mensual expresada en °C, la cual deberá prolongarse hasta encontrar la escala en que están los valores de la evapotranspiración potencial dada en mm/día. El cruce de dicha línea y la escala encontrada, fija el valor de la evaporación potencial diaria en mm/día.

El valor de la evapotranspiración potencial en mm/día se multiplica por el número de días que tiene el mes y/o por los días que cubre el cultivo y se tiene el valor de evapotranspiración mensual en mm/día y/o en mm/ciclo.

**8. Cuenca.** Unidad natural definida por la existencia de la divisoria de las aguas en un territorio dado. Sus límites quedan establecidos por la divisoria geográfica



principal de las aguas de las precipitaciones; también conocido como "parteaguas". El parteaguas, teóricamente, es una línea imaginaria que une los puntos de máximo valor de altura relativa entre dos laderas adyacentes pero de exposición opuesta; desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de emisión, en la zona hipsométricamente más baja.

Al interior de las cuencas se pueden delimitar subcuencas o cuencas de orden inferior. Las divisorias que delimitan las subcuencas se conocen como parteaguas secundarios.

a. **Trazo de una cuenca.** Las áreas de las cuencas o áreas de escurrimiento representan la potencialidad de captación de agua hasta el sitio de captación. Se comienza por trazar el "parteaguas" de la cuenca por aprovechar. Este parteaguas lo define la topografía de las montañas circundantes al sitio de captación. En teoría, una gota de lluvia que cae exactamente sobre el parteaguas se dividirá 50% hacia la cuenca en estudio y el restante 50% hacia otras cuencas aledañas. El área interior del parteaguas define el área de la cuenca y se mide en kilómetros cuadrados.

**9. Infiltración.** La infiltración es el proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo.

La tasa de infiltración, en la ciencia del suelo, es una medida de la tasa a la cual el suelo es capaz de absorber la precipitación o la irrigación. Se mide en pulgadas por hora o milímetros por hora. Las disminuciones de tasa hacen que el suelo se sature. Si la tasa de precipitación excede la tasa de infiltración, se producirá esorrentía a menos que haya alguna barrera física. Está relacionada con la conductividad hidráulica saturada del suelo cercano a la superficie. La tasa de infiltración puede medirse usando un infiltrómetro.

La infiltración está gobernada por dos fuerzas: la gravedad y la acción capilar.

Los poros muy pequeños empujan el agua por la acción capilar contra la fuerza



de la gravedad. La tasa de infiltración se ve afectada por características del suelo como la facilidad de entrada, la capacidad de almacenaje y la tasa de transmisión por el suelo. En el control de la tasa y capacidad infiltración desempeñan un papel la textura y estructura del suelo, los tipos de vegetación, el contenido de agua del suelo, la temperatura del suelo y la intensidad de precipitación.

Por ejemplo, los suelos arenosos de grano grueso tienen espacios grandes entre cada grano y permiten que el agua se infiltre rápidamente. La vegetación crea más suelos porosos, protegiendo el suelo del estancamiento de la precipitación, que puede cerrar los huecos naturales entre las partículas del suelo, y soltando el suelo a través de la acción de las raíces. A esto se debe que las áreas arboladas tengan las tasas de infiltración más altas de todos los tipos de vegetación.

La capa superior de hojas, que no está descompuesta, protege el suelo de la acción de la lluvia, y sin ella el suelo puede hacerse mucho menos permeable. En las áreas con vegetación de chaparral, los aceites hidrofóbicos de las hojas suculentas pueden extenderse sobre la superficie del suelo con el fuego, creando grandes áreas de suelo hidrofóbico. Otros eventos que pueden bajar las tasas de infiltración o bloquearla son los restos de plantas secas que son resistentes al remojo, o las heladas. Si el suelo está saturado en un período glacial intenso, puede convertirse en un cemento congelado en el cual no se produce casi ninguna infiltración. Sobre una línea divisoria de aguas probablemente habrá huecos en el cemento helado o el suelo hidrofóbico por donde el agua puede infiltrarse.

Una vez que el agua se ha infiltrado en el suelo, permanece allí y se filtra al agua subterránea, o pasa a formar parte del proceso de escorrentía subsuperficial.

**a. Proceso de infiltración.** El proceso de infiltración puede continuar sólo si hay espacio disponible para el agua adicional en la superficie del suelo. El volumen disponible para el agua adicional depende de la porosidad del suelo y de la tasa a la cual el agua antes infiltrada puede alejarse de la superficie a través del suelo. La tasa máxima a la que el agua puede entrar en un suelo se conoce como

capacidad de infiltración. Si la llegada del agua a la superficie del suelo es menor que la capacidad de infiltración, toda el agua se infiltrará.

Si la intensidad de precipitación en la superficie del suelo ocurre a una tasa que excede la capacidad de infiltración, el agua comienza a estancarse y se produce la escorrentía sobre la superficie de la tierra, una vez que la cuenca de almacenamiento está llena. Esta escorrentía se conoce como flujo terrestre hortoniano. El sistema hidrológico completo de una línea divisoria de aguas se analiza a veces usando modelos de transporte hidrológicos, modelos matemáticos que consideran la infiltración, la escorrentía y el flujo de canal para predecir las tasas de flujo del río y la calidad del agua de la corriente.

Robert E. Horton (1933) sugirió que la capacidad de infiltración rápidamente disminuía durante la fase inicial de una tormenta y luego tendía hacia un valor aproximadamente constante después de un par de horas. El agua antes infiltrada llena los almacenes disponibles y reduce las fuerzas capilares que hacen entrar el agua en los poros. Las partículas de arcilla en el suelo pueden hincharse cuando se mojan, y así reducen el tamaño de los poros. En áreas donde la tierra no está protegida por una capa de residuos forestales, las gotas de lluvia pueden separar las partículas del suelo superficial y lavar las partículas finas en los poros superficiales, lo que puede impedir el proceso de infiltración.

**b. Medición de la infiltración.** Existen dos tipos de infiltrómetros, los de flujo y los de lluvia.

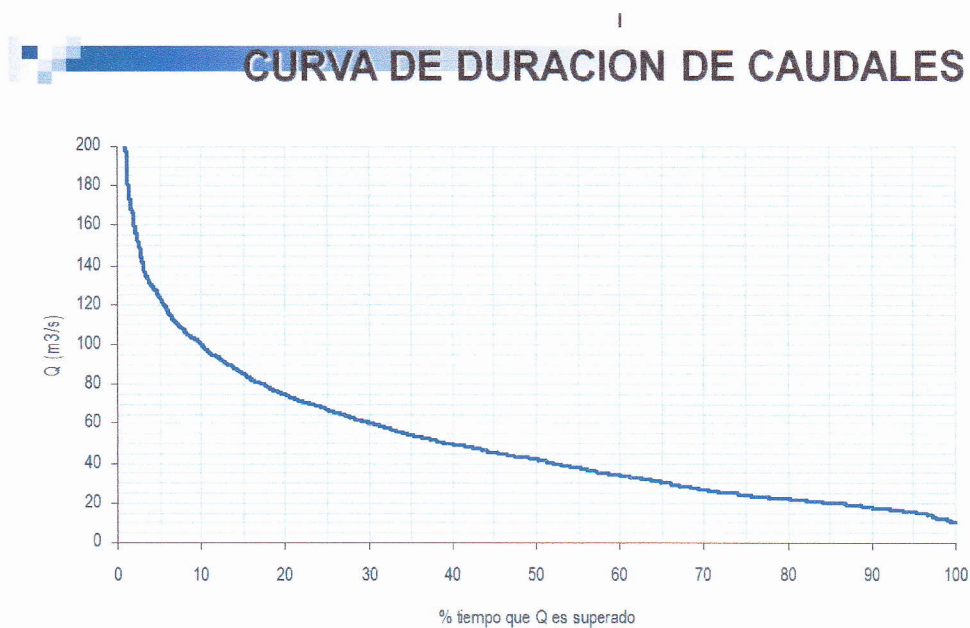
**1) Infiltrómetro de flujo.** Evalúa la infiltración calculando la cantidad de agua que se infiltra en el terreno cuando sobre él existe una altura de agua fija y conocida.

Está formado habitualmente por uno o dos cilindros concéntricos que se insertan en el terreno (la profundidad normal es de 5 cm.). En el cilindro interior se mantiene agua con una altura de 0,5 cm y se evalúa la infiltración en una hora.

**2) Infiltrómetros de lluvia.** Comprenden un área del orden de 4 a 8 m<sup>2</sup> sobre la que se produce una lluvia artificial de distintas intensidades. Cuando se calcula el equilibrio entre lluvia y esorrentía se puede deducir la infiltración por diferencia.

**9) Curva de garantía de caudales.** Es una curva que describe la cantidad de tiempo que puede garantizarse determinado caudal de un flujo superficial dentro de una cuenca.

Gráfica 2. Curva de garantías de caudal



Fuente: Varias

## E. Antecedentes hidráulicos

### 1. Diseño de canales

#### a. Cálculo de la velocidad en un canal: Fórmulas de Chézy y Manning.

La fórmula de Chézy calcula la velocidad del agua en una sección de un cauce o canal.

$$v = C(R * J)^{1/2}$$

donde:

$v$  = velocidad media del agua (m/s)

$R$  = radio hidráulico (m)

$J$  = pendiente de la línea de agua (m/m)

$C$  = coeficiente de Chézy

En la fórmula de Chezy aparece un coeficiente  $C$  que se ha calculado con diversas ecuaciones.

La más usual es la fórmula de Manning:

$$C = (1/n)R^{1/6}$$

donde:

$C$  = coeficiente de Manning, que se aplica en la fórmula de Chézy

$n$  = parámetro de rugosidad de Manning

$R$  = radio hidráulico, en m

La ecuación para la obtención de la velocidad de Manning es la siguiente:

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2}$$

donde  $n$  (rugosidad) es dado por la siguiente tabla:

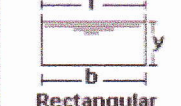


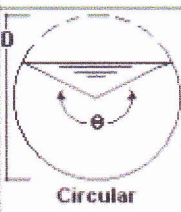



Tabla 10: Rugosidades de Manning según la superficie

Cunetas y canales sin revestir	
En tierra ordinaria, superficie uniforme y lisa	0,020-0,025
En tierra ordinaria, superficie irregular	0,025-0,035
En tierra con ligera vegetación	0,035-0,045
En tierra con vegetación espesa	0,040-0,050
En tierra excavada mecánicamente	0,028-0,033
En roca, superficie uniforme y lisa	0,030-0,035
En roca, superficie con aristas e irregularidades	0,035-0,045
Cunetas y Canales revestidos	
Hormigón	0,013-0,017
Hormigón revestido	0,016-0,022
Encachado	0,020-0,030
Paredes de hormigón, fondo de grava	0,017-0,020
Paredes encachadas, fondo de grava	0,023-0,033
Revestimiento bituminoso	0,013-0,016
Corrientes Naturales	
Limpias, orillas rectas, fondo uniforme, altura de lamina de agua suficiente	0,027-0,033
Limpias, orillas rectas, fondo uniforme, altura de lamina de agua suficiente, algo de vegetación	0,033-0,040
Limpias, meandros, embalses y remolinos de poca importancia	0,035-0,050
Lentas, con embalses profundos y canales ramificados	0,060-0,080
Lentas, con embalses profundos y canales ramificados, vegetación densa	0,100-0,200 <sup>1</sup>
Rugosas, corrientes en terreno rocoso de montaña	0,050-0,080
Aéreas de inundación adyacentes al canal ordinario	0,030-0,200 <sup>1</sup>

Fuente: Varias

Tabla 11: Secciones típicas para canales

Sección	Area hidráulica A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Espejo de agua T
 Rectangular	$by$	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	$b$
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
 Triangular	$zy^2$	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Circular	$\frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$(\frac{\text{sen}\theta}{2})D$ ó $2\sqrt{y(D-y)}$
 Parabólica	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Fuente: Varias

Tabla 12: Pendientes laterales en canales según tipo de suelo

MATERIAL	CANALES POCO PROFUNDOS	CANALES PROFUNDOS
Roca en buenas condiciones	Vertical	0.25 : 1
Arcillas compactas o conglomerados	0.5 : 1	1 : 1
Limos arcillosos	1 : 1	1.5 : 1
Limos arenosos	1.5 : 1	2 : 1
Arenas sueltas	2 : 1	3 : 1
Concreto	1 : 1	1.5 : 1

Fuente: Aguirre Pe, Julián, "Hidráulica de canales", Dentro Interamericano de Desarrollo de Aguas y Tierras – CIDIAT, Merida, Venezuela, 1974

**2. Medición práctica del caudal por el método del flotador.** En este método, de

igual manera, se utilizan los valores promedio de las variables determinadas.

Para el procedimiento se requieren los siguientes materiales y equipos:

Un objeto flotante, puede ser una bola de ping-pong, una botella plástica pequeña, una rama, un trozo de madera que flote libremente en el agua.

Un reloj o cronómetro.

Un decámetro o cinta medidora.

Una regla o tabla de madera graduada.

Primer paso. Seleccionar el lugar adecuado.

Se selecciona en el río un tramo uniforme, sin piedras grandes, ni troncos de árboles, en el que el agua fluya libremente, sin turbulencias, ni impedimentos.

Segundo paso. Medición de la velocidad.

En el tramo seleccionado ubicar dos puntos, A (de inicio) y B (de llegada) y medir la distancia, por ejemplo 5.5 metros.

Una persona se ubica en el punto A con el flotador y otra en el punto B con el reloj o cronómetro.

Se mide el tiempo de recorrido del flotador del punto A al punto B.

Se recomienda realizar un mínimo de 3 mediciones y calcular el tiempo promedio.

La velocidad de la corriente de agua del río se calcula con base en la siguiente ecuación

Velocidad = Distancia (A-B) ÷ Tiempo de recorrido,

Tercer paso. Medición del área de la sección transversal del río.

En el tramo seleccionado, se ubica la sección o el ancho del río que presente las condiciones promedio y en la que se facilite la medición del área transversal.

Esto consiste en dividir el ancho del río en partes y medir la profundidad en cada punto.

Después se procede a realizar la medición del ancho de cada sección donde se midió la profundidad del río.

El área de la sección transversal AT del río se calcula con base en la siguiente ecuación:

$$AT = \sum \text{Ancho} \times \text{Profundidad}$$

Cuarto paso. Cálculo del Caudal del río.

Con los datos obtenidos se procede a calcular el caudal del río, QR, con base en la siguiente ecuación.

$$QR \text{ (m}^3\text{/s)} = \text{Velocidad (m/s)} \times \text{Área Transversal (m}^2\text{)}.$$

**3. Diseño del desarenador.** Para cumplir su función, el desarenador se compone de los siguientes elementos:

-Transición de entrada, la cual une el canal con el desarenador.

-Cámara de sedimentación, en la cual las particular sólidas caen al fondo, debido a la disminución de la velocidad producida por el aumento de la sección transversal. Según Dubuat, las velocidades límites por debajo de las cuales el agua cesa de arrastrar diversas materias son:

arcilla	0.081 m/s
arena fina	0.160 m/s
arena gruesa	0.216 m/s



De acuerdo a lo anterior, la sección transversal de un desarenador, se diseña para velocidades que varían entre 0.1 m/s y 0.4 m/s, con una profundidad media de 1.5 m y 4 m. Observar que para una velocidad elegida y un caudal dado, una mayor profundidad implica un ancho menor y viceversa.

La forma de la sección transversal puede ser cualquiera aunque generalmente se escoge una rectangular o una trapezoidal simple o compuesta.

-Vertedero, al final de la cámara se construye un vertedero sobre el cual pasa el agua limpia hacia el canal. Las capas superiores son las que primero se limpian es por esto que la salida del agua desde el desarenador se hace por medio de un vertedero, que hasta donde sea posible debe trabajar con descarga libre.

También mientras más pequeña es la velocidad de paso por el vertedero, menos turbulencia causa en el desarenador y menos materiales en suspensión arrastra. Como máximo se admite que esta velocidad puede llegar a  $v = 1$  m/s.

-Compuerta de lavado, sirve para desalojar los materiales depositados en el fondo. Para facilitar el movimiento de las arenas hacia la compuerta, al fondo del desarenador se le da una gradiente fuerte del 2% al 6%. El incremento de la profundidad obtenido por efecto de esta gradiente no se incluye en el tirante de cálculo, sino que el volumen adicional obtenido se lo toma como depósitos para las arenas sedimentadas entre dos lavados sucesivos.

Es necesario hacer un estudio de la cantidad y tamaño de sedimentos que trae el agua para asegurar una adecuada capacidad del desarenador y no necesitar lavarlo con demasiada frecuencias.

Algunas consideraciones para el diseño hidráulico son:

Cálculo del diámetro de las partículas a sedimentar

Los desarenadores se diseñan para un determinado diámetro de partícula es decir, que se supone que todas las partículas de diámetro superior al escogido deben

depositarse. Por ejemplo, el valor del diámetro máximo de partícula normalmente admitido para plantas hidroeléctricas es de 0.25 mm.

La fórmula de Owens:

$$W = k \sqrt{d(\rho_s - 1)}$$

Donde:

$w$  = velocidad de sedimentación (m/s)

$d$  = diámetro de partículas (m)

$\rho_s$  = peso específico del material (g/cm<sup>3</sup>)

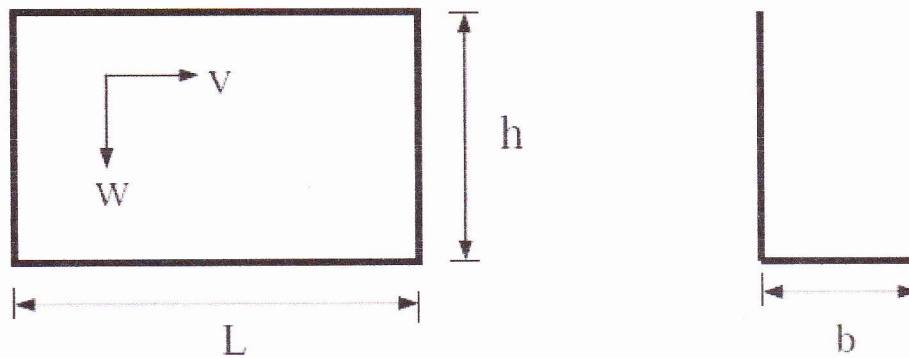
$k$  = constante que varía de acuerdo con la forma y naturaleza de los granos, sus valores se muestran a continuación.

Valores de la constante  $k$

Forma y naturaleza	$k$
arena esférica	9.35
granos redondeados	8.25
granos cuarzo $d > 3$ mm	6.12
granos cuarzo $d < 0.7$ mm	1.28

Cálculo de las dimensiones del tanque

Despreciando el efecto del flujo turbulento sobre la velocidad de sedimentación, se puede plantear las siguientes relaciones:



Caudal:  $Q = b h v \rightarrow$  ancho del desarenador:  $b = \frac{Q}{hv}$  ..... (1)

Tiempo de caída:

$$w = \frac{h}{t} \rightarrow t = \frac{h}{w} \text{ ..... (2)}$$

Tiempo de sedimentación:

$$v = \frac{L}{t} \rightarrow t = \frac{L}{v} \text{ ..... (3)}$$

Igualando (2) = (3):

$$\frac{h}{w} = \frac{L}{v}$$

De donde la longitud, aplicando la teoría de simple sedimentación es:

$$L = \frac{hv}{w} \text{ ..... (4)}$$

**4. Cálculo de pérdidas por fricción método de Darcy-Weisbach.** La ecuación de Darcy-Weisbach es una ecuación ampliamente usada en hidráulica. Permite el cálculo de la pérdida de carga debida a la fricción dentro una tubería.

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

donde:

$h_f$  = pérdida de carga debida a la fricción.

$f$  = factor de fricción de Darcy.

L = longitud de la tubería.

D = diámetro de la tubería.

v = velocidad media del fluido.

g = aceleración de la gravedad:  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

El factor de fricción (f) es adimensional y es función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa de la tubería

$$f = f\left(R_e, \frac{K}{D}\right)$$

Es un hecho demostrado que la rugosidad relativa no influye sobre f en régimen laminar ( $Re < 2000$ ), ya que el rozamiento se debe fundamentalmente a la fricción de unas capas de fluido sobre otras y no de éstas sobre las paredes de la tubería.

El valor de f puede conocerse acudiendo al diagrama de Moody, el cual se basa en la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.869 \ln \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.523}{R\sqrt{f}} \right)$$



Gráfica 3: Diagrama de Moody para el factor de fricción.

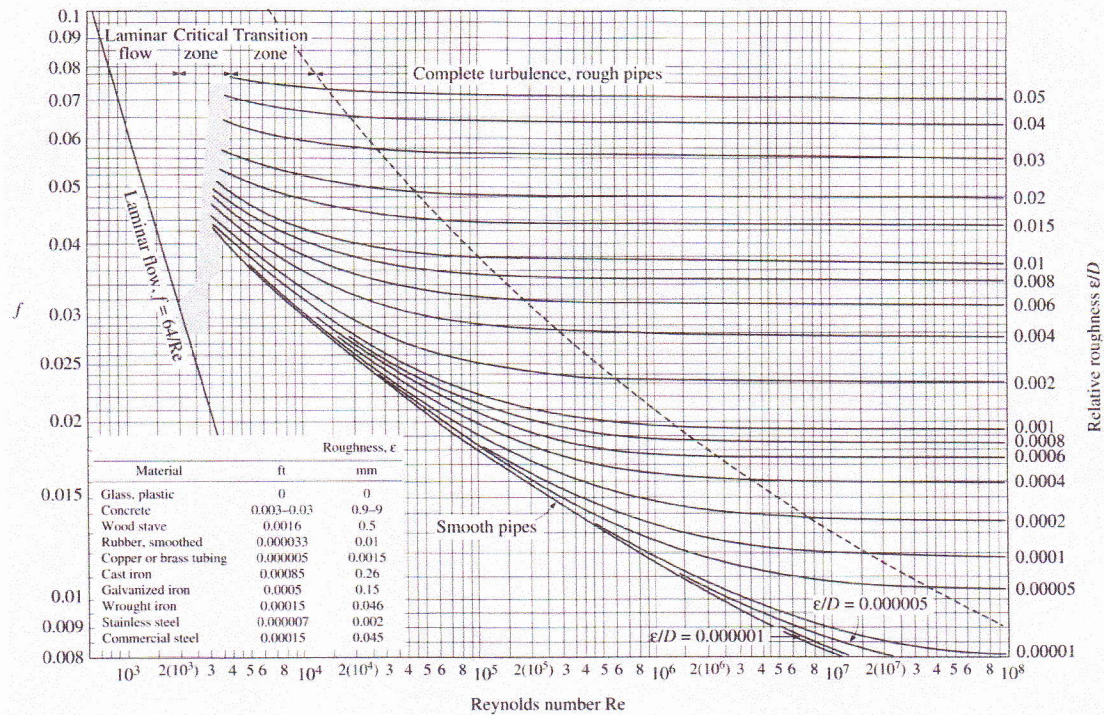


FIGURE A-27

The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

## F. Conceptos hidroenergéticos

1. **Potencia.** La potencia de una central hidroeléctrica se mide generalmente en Megavatios (MW) y se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$P_e = \rho \cdot 9,81 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot Q \cdot H$$

donde:

- $P_e$  = potencia en vatios (W)
- $\rho$  = densidad del fluido en  $\text{kg/m}^3$
- $\eta_t$  = rendimiento de la turbina hidráulica (entre 0,75 y 0,90)
- $\eta_g$  = rendimiento del generador eléctrico (entre 0,92 y 0,97)

- $\eta_m$  = rendimiento mecánico del acoplamiento turbina alternador (0,95/0.99)
- Q = caudal turbinable en  $m^3/s$
- H = desnivel disponible en la presa entre aguas arriba y aguas abajo, en metros (m)

**2. Energía.** Tiene la posibilidad de ser transformada fácilmente en cualquier otra forma de energía con un rendimiento satisfactorio, además su transporte es económico por líneas aéreas. Su único inconveniente es el no presentar un medio cómodo para almacenarla.

Sus unidades son:

Kilovatio hora = KWh (3.6 millones de julios o Newtons metro)

Megavatio hora = MWh (1000 KWh)

**3. Energía hidráulica.** Es aquella que se obtiene del aprovechamiento de las corrientes de los ríos (energía cinética), de los saltos de agua (energía potencial) y la gravedad (energía gravitacional). Esta energía aplicada a pequeños rotores de palas, molinos o turbinas, genera un movimiento rotacional que se convierte en energía mecánica utilizable en diversas actividades, siendo la aplicación más significativa la producción de energía eléctrica.

La energía hidráulica tiene la cualidad de ser renovable, pues sólo utiliza el agua sin agotarla, la fuente primaria al explotarla es limpia, ya que no produce sustancias de ningún tipo, al contrario el agua se oxigena cuando sale de las turbinas.

## **G. Antecedentes financieros**

**1. Cálculo de la tasa de descuento ó Tasa Mínima Atractiva de Retorno.** La Tasa Mínima Atractiva de Retorno (TMAR) sin inflación es la tasa de ganancia anual mínima para considerar el proyecto factible o no. La TMAR es la tasa de crecimiento real de la empresa por arriba de la inflación. En otras palabras es la tasa de retorno que el capital generaría al no ser invertido en el proyecto. Esta tasa también es conocida como "premio al riesgo", de forma que en su valor debe de reflejar el riesgo que corre el inversionista de no obtener las ganancias pronosticadas y que eventualmente vaya a la bancarrota. Preventivamente se le añade a la TMAR el riesgo de la inflación.

El valor de la TMAR depende básicamente de cuatro parámetros:

- La estabilidad de la demanda del producto,
- Las condiciones de competencia del mercado,
- La estabilidad o inestabilidad de las condiciones macroeconómicas del país y de Estados Unidos debido a que el préstamo es en dólares.
- Los métodos de financiamiento.

**2. Tasas de intereses del banco G&T para préstamos en dólares de magnitudes similares a los proyectos definidos en este estudio de pre factibilidad.**

Dos ejemplos se presentan en la siguiente página



Tabla 13: Ejemplo de tasa de interés en dólares 1

BANCO G&amp;T CONTINENTAL, S.A.

GUATEMALA, 23 de Febrero de 2010

**RESOLUCIÓN DE GERENCIA No. 2316-10**

La Gerencia del Banco G&T Continental, S.A., de conformidad con las facultades otorgadas por el Consejo de Administración, resuelve conceder bajo las condiciones que a continuación se detallan, la siguiente operación crediticia:

**PRÉSTAMO FIDUCIARIO****DEUDOR****FIADOR****MONTO** Q3,650,000.00 (tres millones seiscientos cincuenta mil quetzales)**GARANTÍA** FIDUCIARIA, mancomunadamente solidario con la parte DEUDORA**DESTINO** Compra de vehículos y equipo.**PLAZO** 66 meses, a partir de la fecha de su formalización.**PERÍODO DE GRACIA** 6 meses, en el pago a capital -**FORMA DE DESEMBOLSO** Desembolsos parciales contra la presentación de facturas.**FORMA DE PAGO** Amortizaciones mensuales y consecutivas a capital de Q60,000.00 cada una, a partir del séptimo mes de la fecha de su desembolso y saldo al vencimiento.**TASA DE INTERÉS** 8.50% anual variable, pagaderos mensualmente.

Fuente: G&amp;T

Tabla 14: Ejemplo de tasa de interés en dólares 2

BANCO G&amp;T CONTINENTAL, S.A.

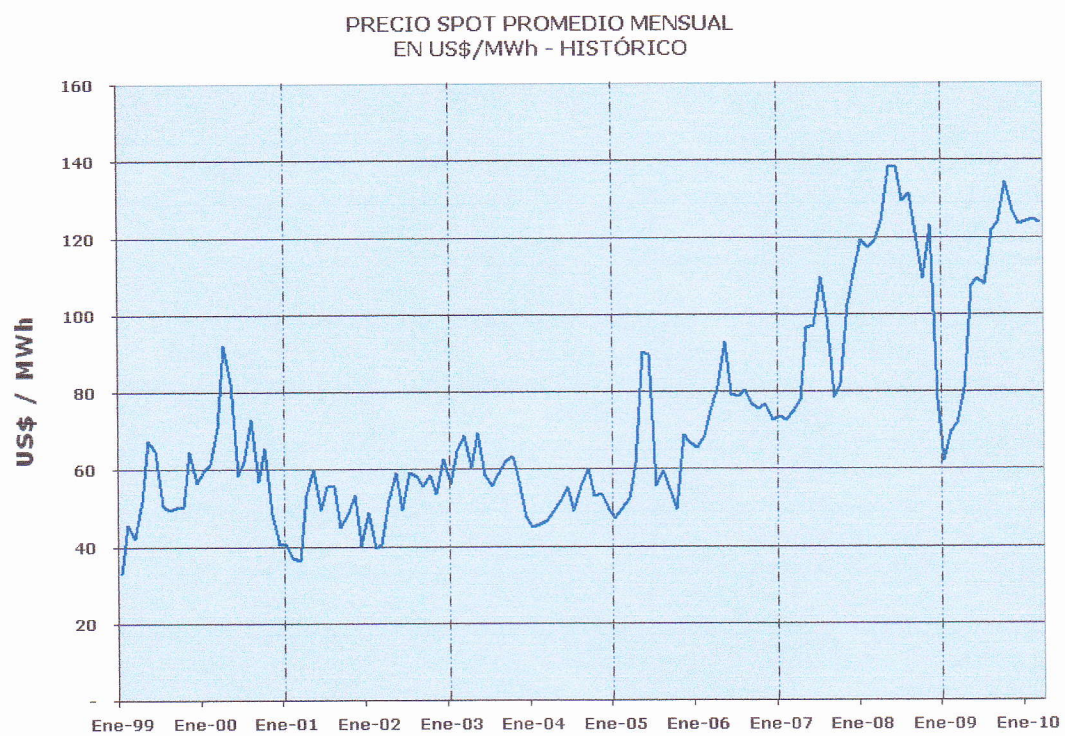
**CONSEJO DE ADMINISTRACIÓN**Acta No. 499 de fecha 8 de marzo de 2011**PRÉSTAMO FIDUCIARIO****DEUDOR:****CODEUDOR:** ---**MONTO** Q8,000,000.00 (OCHO MILLONES DE QUETZALES)**GARANTÍA** FIDUCIARIA, del deudor. -**DESTINO** Inversión en activos. -**PLAZO:** 5 AÑOS A PARTIR DE LA FECHA DE SU FORMALIZACIÓN.**FORMA DE PAGO:** AMORTIZACIONES MENSUALES Y CONSECUTIVAS A CAPITAL DE Q133,000.00 CADA UNA, A PARTIR DEL MES SIGUIENTE DE LA FECHA DE SU FORMALIZACIÓN, Y SALDO AL VENCIMIENTO**FORMA DE DESEMBOLSO** Gradual a solicitud del Deudor por escrito.**TASA DE INTERÉS:** 7.25 % ANUAL VARIABLE, PAGADEROS MENSUALMENTE

Fuente: G&amp;T



3. **Precio histórico Spot promedio mensual de la energía en US \$.** El precio de la energía esta dado en \$ y es el precio promedio mensual de la energía en MWh de enero de 1999 a enero del 2010.

Gráfica 4: Precio Spot histórico de la energía



Fuente: INDE

#### IV. CONDICIONES NATURALES DEL TERRENO

##### A. Topografía

El mapa topográfico fue comprado al IGN (Instituto Geográfico Nacional). El mapa tiene curvas de nivel a cada 20 metros y es un extracto del departamento de Alta Verapaz y contiene la vista completa del río Sayté.

La topografía del área es sumamente montañosa, sin embargo el río Sayté fluye al en la parte más baja de la unión entre las montañas. El río pasa por pequeños valles y también por estrechos cañones dentro de la finca El Paraíso de Secanquim por lo que existen áreas ideales para embalses por los cañones o cuartos de máquinas por las planicies. El río no cuenta con mayor pendiente y analizando preliminarmente se puede observar que la caída máxima tentativa entre una posible presa y el cuarto de máquinas no es significativa siendo la cota máxima de elevación del río de 200 msnm (captación del río) y la mínima de 180 msnm (casa de máquinas) y con una distancia entre ambas cotas de 1200 metros dentro de la finca.

Adicionalmente para poder medir la caída empíricamente se tuvo que utilizar un método más simple usando una manguera transparente llena de agua para poder mantener un nivel determinado y poder trasladarlo a lo largo del terreno. Al llegar al lugar definido para la caída se pudo medir la misma con un metro y una estaca. La distancia se tomó del punto más alto, definido por la traslación del nivel de captación del río por medio de la manguera con agua, hasta el punto más bajo donde se ubicaría la turbina. El resultado fue el siguiente:

<b>Caída (m)</b>	15.6
------------------	------

El terreno en su mayoría es quebrado pero la pendiente disminuye al acercarse al río. La casa de máquinas esta muy cercano al río por lo que es un área relativamente plana. Las demás obras como por ejemplo el canal desarenador, cámara de presión y tubería forzada, se trazaron tratando de evitar zonas de derrumbe y buscando lomas estables. Hay mucha vegetación y árboles por lo que los taludes son relativamente estables.



Mapa Topográfico con la ubicación geográfica de la finca El Paraíso de Secanquim así como la ubicación de las mediciones empíricas de la caída utilizando manguera para mantener el nivel.

Mapa 1: Ubicación de medición en campo de caída

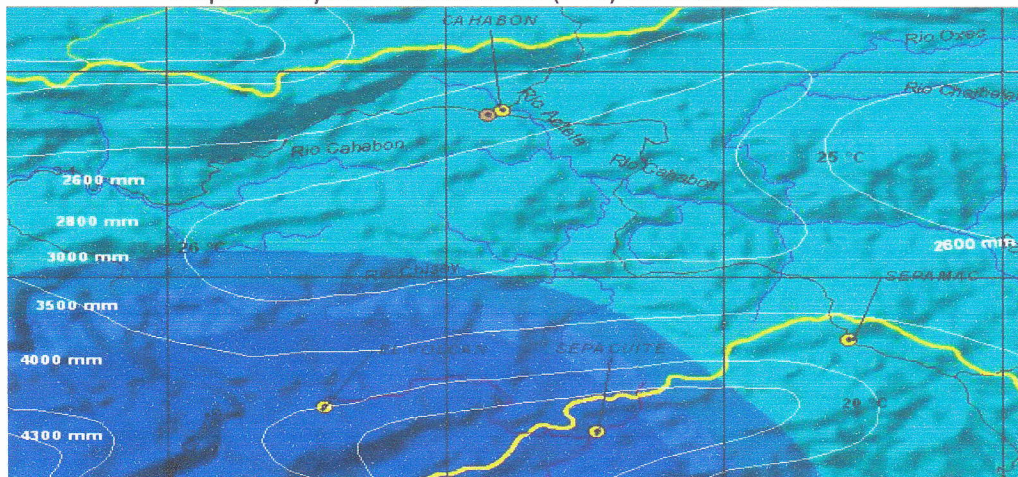


Fuente: Andrés Scheel

## B. Precipitación

La cuenca del río Sayté, el río Chisay y la quebrada Muquilá se encuentran cercana a las isoyetas de precipitación de 3250 mm, 3250 mm y 2800 respectivamente que es una medida promedio anual. Se tomaron estos valores de precipitación para el cálculo del caudal que se verá en el balance hídrico.

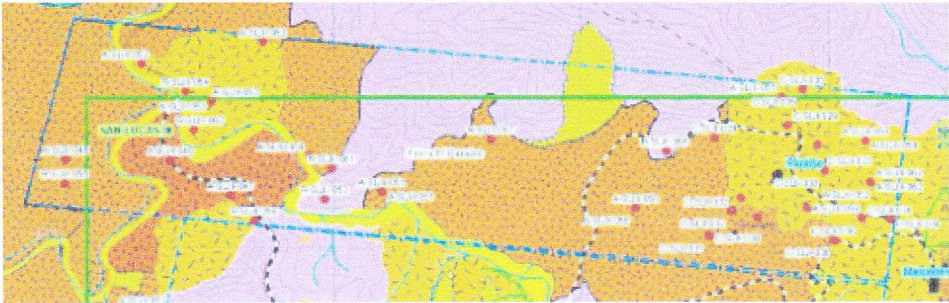
Mapa 2: Isoyetas medias anual (mm) del área de estudio



Fuente: INSIVUMEH, 2003

C. Condiciones geológicas

Mapa 3: Mapa geológico de la Finca El Paraíso de Secanquim



Fuente: MAYANIQUEL

Tabla 15: Leyenda de tipos de suelo

<b>Cuaternario</b>	<b>Roca</b>		
<b>Deposito</b>	<table border="0"> <tr><td></td><td>Area no cartografiada</td></tr> </table>		Area no cartografiada
	Area no cartografiada		
	Aluvion		
	Coluvion		
<b>Suelo</b>	<b>Clasificacion</b>		
<b>Origen</b>		Form. Sepur	
	Suelo de Basalto		
	Laterita		
<b>Zona de Bloques</b>		Form. Cobán	
<b>Origen</b>		Basalto	
	Suelo con bloques de Basalto		
	Suelo con bloques de Gabro		
	Laterita con bloques de peridotita		
		Peridotita	
		Diques de Gabro	

Fuente: MAYANIQUEL

Como se puede observar en el cuadro anterior, la finca tiene diferentes tipos de suelo. Las estructuras como canales presas y cuartos de maquinas están siendo diseñados sobre suelos rocosos como la Peridotita y Diques de Gabro los cuales tienen suficiente capacidad de darle soporte de cimentación a las diferentes estructuras al mismo tiempo se pueden usar estos materiales para la construcción de las estructuras.



## 1. Peridotita

Figura 8: Peridotita



Fuente: Varias

La peridotita es una roca ígnea plutónica formada por lo general de olivino (peridoto) acompañados de piroxenos y anfíboles. Es muy densa y de coloración oscura. Se trata de la roca que forma el manto terrestre.

## 2. Diques de Gabro

Figura 9: Dique de Gabro



Fuente: Varias

El gabro es una roca ígnea plutónica compuesta de plagioclasas, minerales ferromagnésicos y piroxenos. Contiene silicato aluminico, cálcico y diálaga como minerales fundamentales.

Los gabros son rocas pesadas, granudas y moteadas, de color oscuro entre gris y verde.

#### D. Cuencas

El río Sayté, el río Chisay y la quebrada Muquilá se encuentran en la cuenca del río Cahabon.

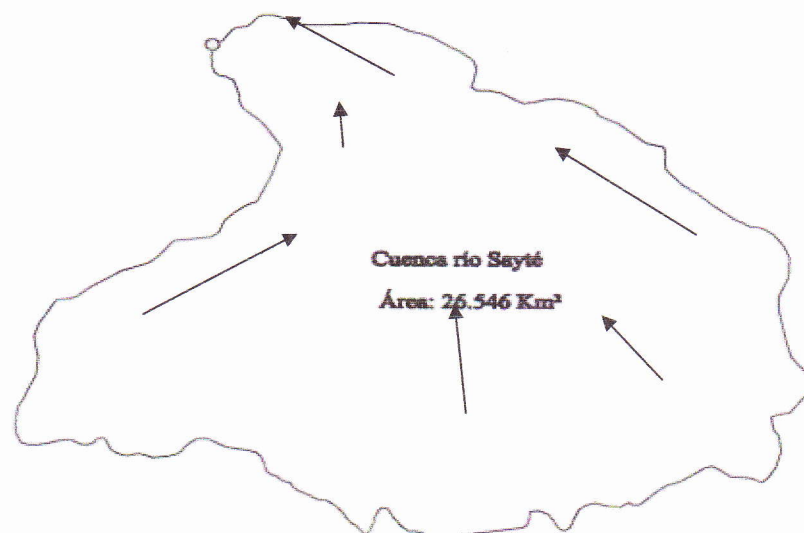
Se puede observar que el río Sayté está alimentado por diversos riachuelos y quebradas siendo los más importantes el riachuelo Jalauté y las quebradas Cantelical y Jalauté. El río pasa en su mayoría por la finca Secanquim y la finca San Lucas.

El río Chisay está alimentado también por diversos ríos, riachuelos y quebradas siendo los más importantes el río Mayté y las quebradas Chajló, Chixum, Saco, Chichejchem, Chimulac, Alquim, Chimacuy, Chimay y Chacdú. Éstas afluentes están en su mayoría fuera de la Finca Secanquim. La quebrada Muquilá es alimentada por otras quebradas pequeñas.

Adicionalmente se delimitaron las cuencas del río Sayté, el río Chisay y la quebrada Muquilá para crear posibles esquemas de embalse general aprovechando diferentes caudales.

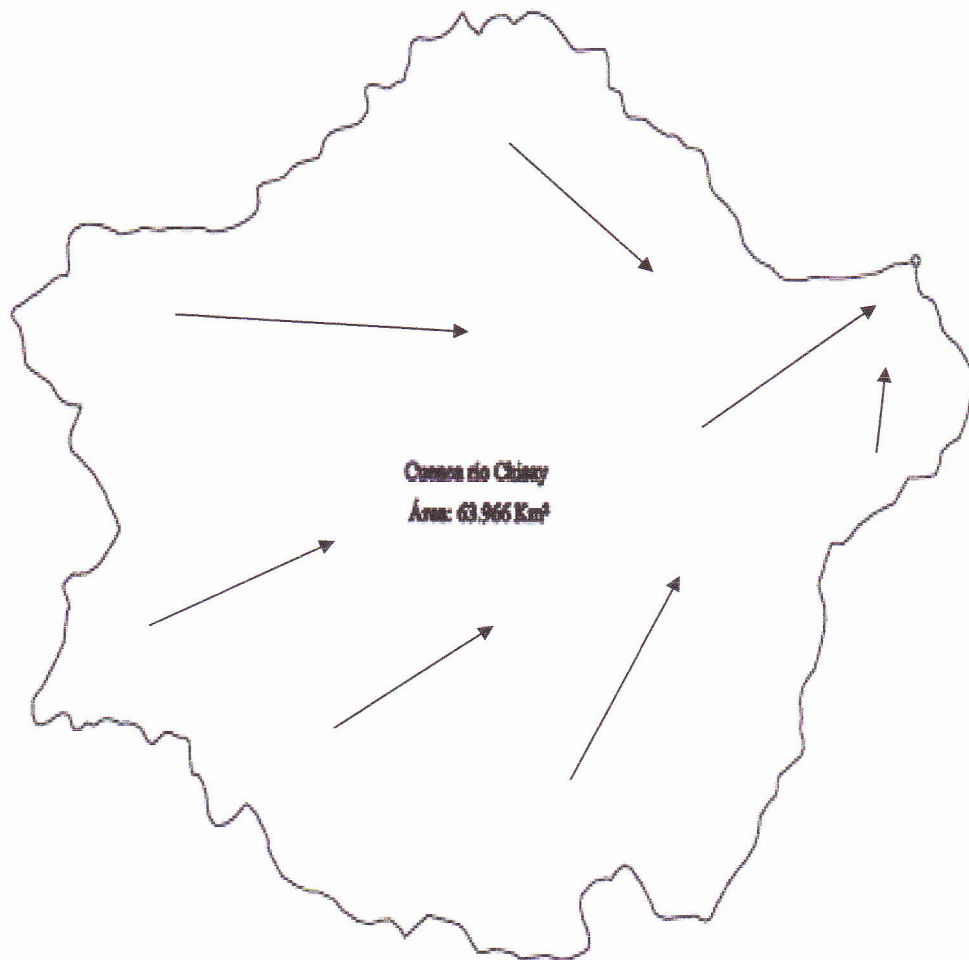
Los resultados son los siguientes:

Figura 10: Cuenca Sayté



Fuente: Andrés Scheel

Figura 11: Cuenca Chisay



Fuente Andrés Scheel



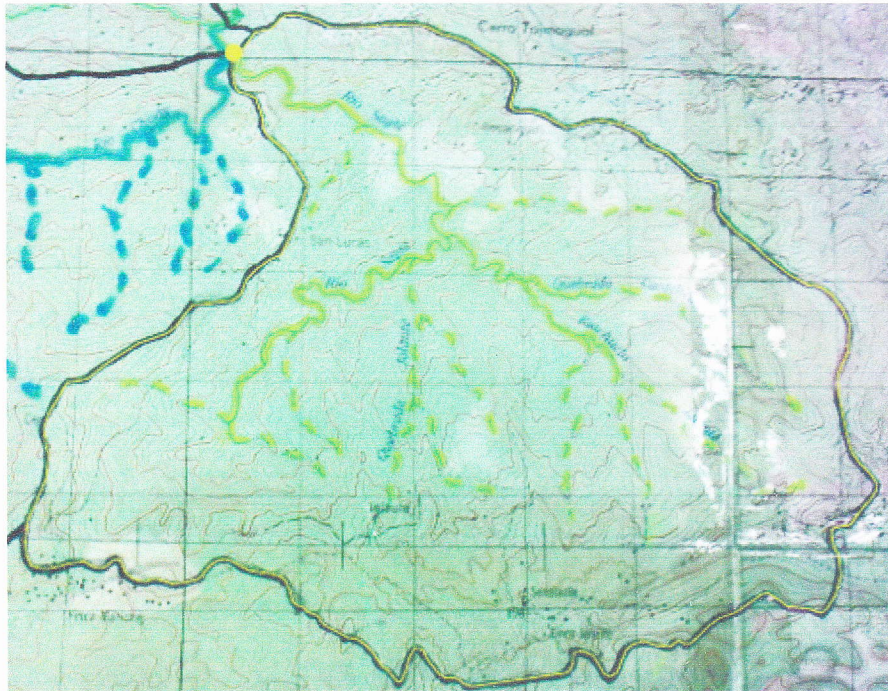
Figura 12: Cuenca Muquilá



Fuente: Andrés Scheel

Mapa con cuencas delimitadas.

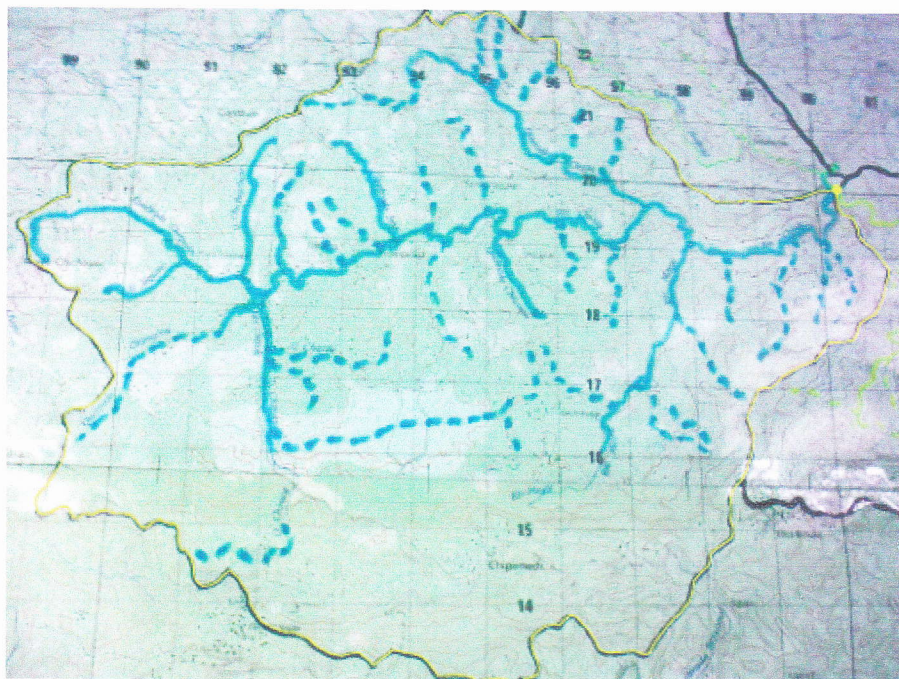
Mapa 4: Cuenca del río Sayté



Fuente: Andrés Scheel

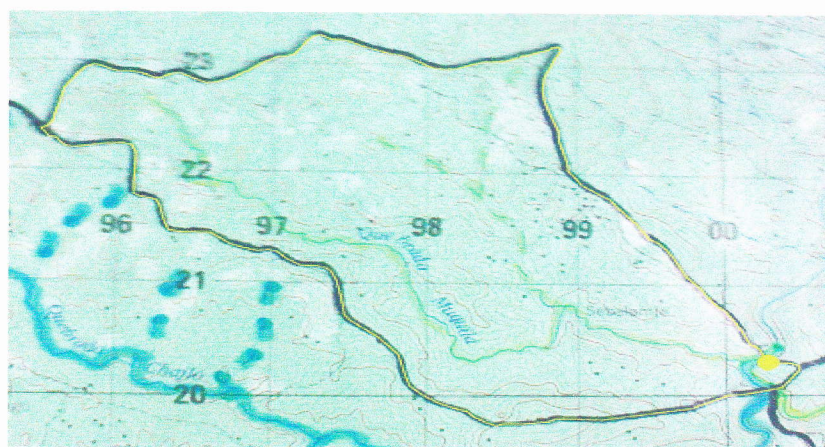


Mapa 5: Cuenca del río Chisay.



Fuente: Andrés Scheel

Mapa 6: Cuenca de la quebrada Muquilá



Fuente: Andrés Scheel

## E. Caudales

**1. Balance hídrico.** Los caudales se obtuvieron con la ecuación general del balance hídrico.

$$e = P + Q_{se} + Q_{te} - E - Q_{ss} - Q_{ts} - \Delta S$$

Donde:

P = aportación pluviométrica, que se obtuvo con el mapa de isoyetas proporcionado por el INSIVUMEH.

E = evapotranspiración real, obtenido con el método de Turc.

Q<sub>ss</sub> = caudal de superficie saliente, en forma de los ríos Sayté y Chisay y la quebrada Muquilá para sus respectivas cuencas.

Q<sub>se</sub> que es el caudal superficial entrante se toma como 0 ya que no existe una entrada proveniente de cuencas ajenas.

Q<sub>te</sub>, Q<sub>ts</sub>, ΔS y e que son el caudal subterráneo entrante, caudal subterráneo saliente, variación del almacenamiento (final - inicial) que en condiciones ideales de medida debe ser igual al error de cierre y el error de cierre respectivamente se despreciaron por ser cuencas muy pequeñas.

Por lo que la ecuación del balance hídrico queda de la siguiente manera:

$$\cancel{e} = P + \cancel{Q_{se}} + \cancel{Q_{te}} - E - Q_{ss} - \cancel{Q_{ts}} - \cancel{\Delta S}$$

Es decir,

$$Q_{ss} = P - E$$

El caudal de superficie saliente es igual a la aportación pluviométrica menos la evapotranspiración.

**2. Cálculo de caudales mediante el método de evapotranspiración de Turc.** La evapotranspiración se obtuvo utilizando el método de evapotranspiración de Turc ya que según la práctica en Guatemala, proporciona resultados acertados, a diferencia de



otros métodos. El método de Turc se apeg a la pluviometría, altimetría y temperatura de Guatemala.

Adicionalmente y como un ejercicio práctico y de comprobación, se midió empíricamente el caudal del río Sayté para comparar datos.

Tabla 16: Cálculo de caudales método de Turc para cada río y la suma de todos.

	Cuenca	Precipitación	Temperatura	Turc Evapotrans.	Lamina de Esc.	Escorrimento	Caudales medios
	(km <sup>2</sup> )	(mm)	°C		(mm)	(hm <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> /seg)
<u>Sayté</u>	26.55	3250	25.5	1766.57	1679.89	44.60	<b>1.42</b>
<u>Chisay</u>	66.97	3250	25.5	1766.57	1679.89	112.50	<b>3.57</b>
<u>Muquílá</u>	7.71	2800	25.5	1766.57	1284.20	9.90	<b>0.31</b>
					<b>Totales</b>	<b>167.00</b>	<b>5.30</b>

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 17: Caudal clasificados para cada sub cuenca y la suma de todos. Método de Turc.

#### Q. Clasificados (m<sup>3</sup>/seg)

	Coef.Pardee	<u>Sayté</u>	<u>Chisay</u>	<u>Muquílá</u>	Total
CCS	0.20	0.28	0.71	0.06	1.06
CC11	0.30	0.43	1.07	0.09	1.59
CC9	0.40	0.57	1.43	0.12	2.12
CC6	0.70	0.99	2.50	0.22	3.71
CC3	1.35	1.92	4.82	0.42	7.16
CC1	2.50	3.55	8.93	0.78	13.25

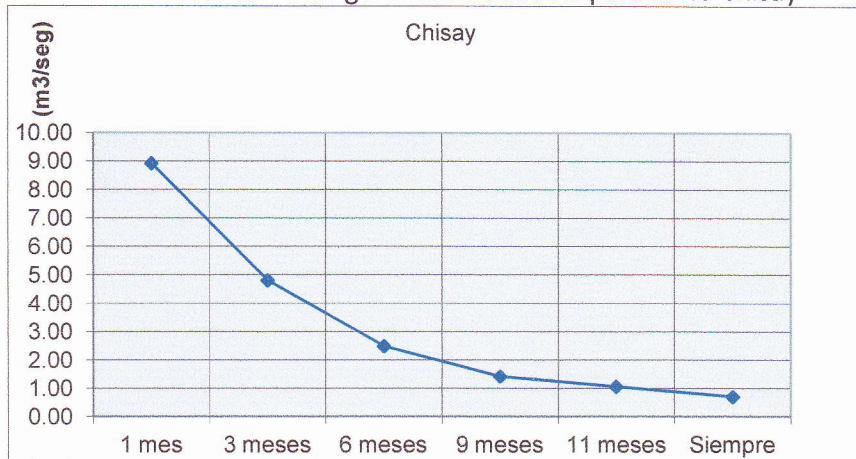
Fuente: Andrés Scheel

### 3. Curvas de garantía de caudales

Gráfica 5: Curva de garantías de caudal para el río Sayté

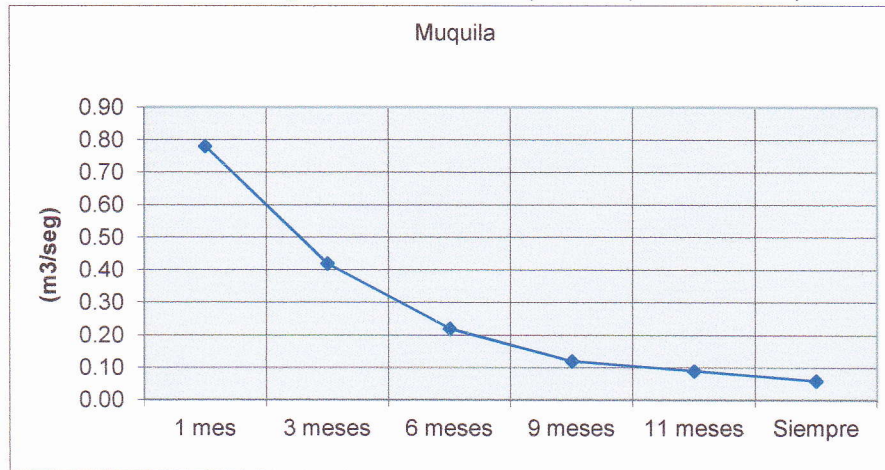


Gráfica 6: Curva de garantías de caudal para el río Chisay



Fuente: Andrés Scheel

Gráfica 7: Curva de garantías de caudal para la quebrada Muquiá



Fuente: Andrés Scheel

Gráfica 8: Curva de garantías de caudal total



Fuente: Andrés Scheel



**4. Medición empírica del caudal del río Sayté.** La recolección de datos de campo se hizo durante las fechas del 17 de Mayo del 2009 al 20 de Septiembre del 2009 por, Hugo Scheel, Walter Scheel, Stefan Scheel y Andrés Scheel. Las mediciones se hicieron durante estas fechas ya que se medía la época más seca del año en esa área y luego una época de mucha lluvia proporcionándose caudales relativamente extremos. Las mediciones se hicieron alrededor de la 1:00 P.M.

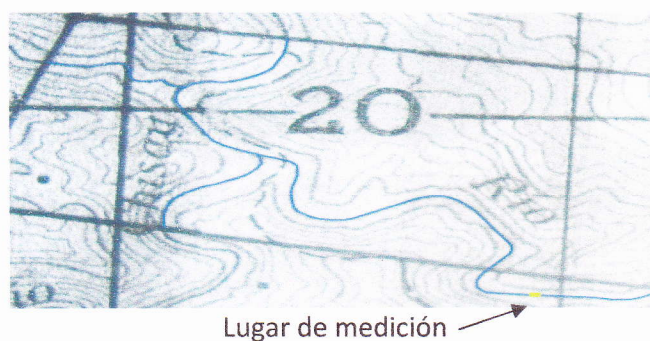
El objetivo de estas mediciones es corroborar los caudales calculados con las Isoyetas.

El punto que se escogió para hacer las mediciones fue definido por las siguientes características:

- Cercanía del posible punto de cierre o captación del río para los canales
- Forma uniforme del río
- Aparente velocidad constante
- Piedras en los bordes que proporcionarían fácil lectura al subir o bajar de nivel el río, sin aumentar considerablemente el ancho del mismo.
- Superficie relativamente plana en el fondo del río

**a. Ubicación del punto de medición**

Figura 13: Ubicación de la medición en campo del caudal



Fuente: Andrés Scheel

**b. Velocidad del río Sayté.** Para medir la velocidad se marcó una línea a lo ancho del río. Desde allí se midió perpendicularmente 5.5 metros sobre el río. (fotos en el apéndice)

Al mismo tiempo se llenó un flotador a 1/3 de su capacidad de agua, esto se hizo para evitar que flotara superficialmente y que por su inercia fuera más lento que el río. También se llenó porque el punto de mayor velocidad del río es en el centro (dimensiones en cuanto a profundidad y ancho) donde la fricción es menor contra los bordes del mismo. Sin embargo la botella no llegaba al centro (dimensión de profundidad) del río por lo que los datos que se generaron son conservadores.

El flotador se liberó en diferentes puntos a lo ancho del río y mientras más cerca del centro estaba, mayor era su velocidad. De estos datos se obtuvo la velocidad promedio para cada día de medición. Estos datos por día se compararon con los datos de otros días para tener un promedio general de velocidad del río.

Los resultados son los siguientes:

Tabla 18: Tiempos y velocidades del río Sayté 17.05.09

Fecha 17.05.09		
Distancia de recorrido del flotador en metros		5.50
No.	Tiempos	Velocidad
1	11.00	0.50
2	9.00	0.61
3	9.50	0.58
4	13.00	0.42
5	13.50	0.41
6	16.00	0.34
7	12.00	0.46
8	13.00	0.42
9	12.00	0.46
10	10.00	0.55
Velocidad promedio m/s		<b>0.48</b>

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 19: Tiempos y velocidades del río Sayté 7.06.09

Fecha 7.06.09		
Distancia de recorrido del flotador en metros		5.50
No.	Tiempos	Velocidad
1	18.50	0.30
2	13.00	0.42
3	23.50	0.23
4	18.50	0.30
5	15.00	0.37
6	14.00	0.39
7	18.00	0.31
8	17.50	0.31
9	16.00	0.34
10	17.00	0.32
Velocidad promedio m/s		<b>0.33</b>

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 20: Tiempos y velocidades del río Sayté 29.06.09

Fecha 29.06.09		
Distancia de recorrido del flotador en metros		5.50
No.	Tiempos	Velocidad
1	8.00	0.69
2	9.00	0.61
3	7.00	0.79
4	7.00	0.79
5	6.00	0.92
6	9.00	0.61
7	11.00	0.50
8	9.00	0.61
9	11.00	0.50
10	10.00	0.55
Velocidad promedio m/s		<b>0.66</b>

Fuente: Andrés Scheel



Tabla 21: Tiempos y velocidades del río Sayté 2.08.09

<b>Fecha 2.08.09</b>		
Distancia de recorrido del flotador en metros		5.50
No.	Tiempos	Velocidad
1	5.60	0.98
2	5.60	0.98
3	4.20	1.31
4	4.20	1.31
5	4.20	1.31
6	4.20	1.31
Velocidad promedio m/s		<b>1.20</b>

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 22: Tiempos y velocidades del río Sayté 6.09.09

<b>Fecha 6.09.09</b>		
Distancia de recorrido del flotador en metros		5.50
No.	Tiempos	Velocidad
1	8.89	0.62
2	6.69	0.82
3	5.54	0.99
4	5.95	0.92
5	6.52	0.84
6	7.66	0.72
7	6.8	0.81
8	8.72	0.63
9	6.88	0.80
Velocidad promedio m/s		<b>0.80</b>

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 23: Tiempos y velocidades del río Sayté 20.09.09

<b>Fecha 20.09.09</b>		
Distancia de recorrido del flotador en metros		5.50
No.	Tiempos	Velocidad
1	9.18	0.60
2	8.02	0.69
3	8.95	0.61
4	7.39	0.74
5	6.12	0.90
6	6.88	0.80
7	6.93	0.79
8	6.41	0.86
9	6.71	0.82
10	7.56	0.73
11	7.50	0.73
Velocidad promedio m/s		<b>0.75</b>

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 24: Resumen de tiempos y velocidades del río Sayté

<b><u>Promedio de velocidades por fecha</u></b>	
	m/s
<b>Fecha 17.05.09</b>	<b>0.48</b>
<b>Fecha 7.06.09</b>	<b>0.33</b>
<b>Fecha 29.06.09</b>	<b>0.66</b>
<b>Fecha 2.08.09</b>	<b>1.20</b>
<b>Fecha 6.09.09</b>	<b>0.80</b>
<b>Fecha 20.09.09</b>	<b>0.75</b>
<b><u>Promedio total de Velocidad (m/s)</u></b>	
	0.702

Fuente: Andrés Scheel

c. **Medición del área transversal del río Sayté.** Se midió el ancho del río y luego la profundidad del agua a cada metro. Estos datos se tomaron cada vez que se midió las velocidades. Con la información se pudo obtener el área transversal del río.

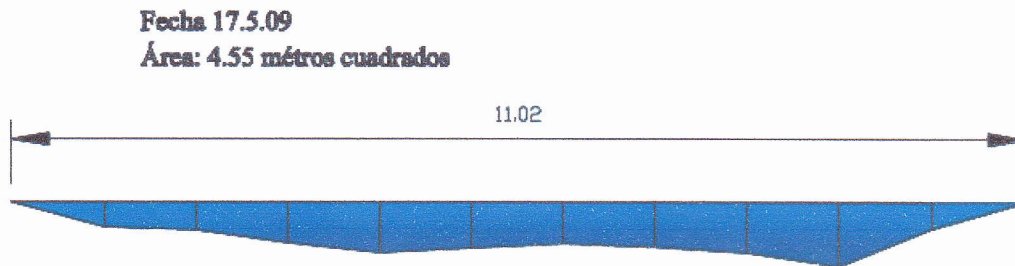
Los resultados son los siguientes:

Tabla 25: Área transversal del río Sayté 17.05.09

<b>Fecha 17.05.09</b>	
Ancho del río en metros	
11.02	
<b>Profundidad a cada metro</b>	
Distancia (m)	Profundidad (cm)
1	27.00
2	30.50
3	44.50
4	55.00
5	50.00
6	45.00
7	49.00
8	55.00
9	69.50
10	29.00

Fuente: Andrés Scheel

Figura 14: Área transversal río Sayté 17.5.09



Fuente: Andrés Scheel

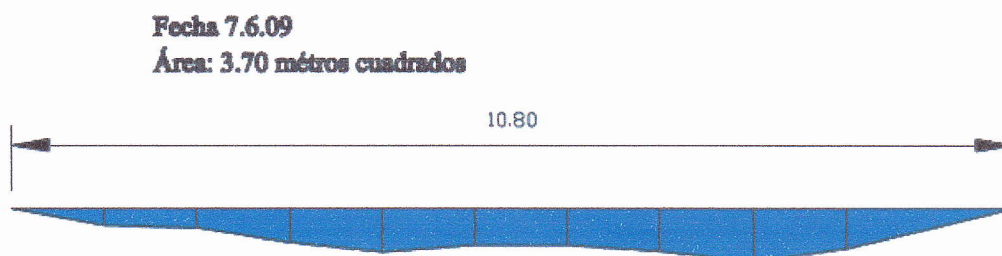


Tabla 26: Área transversal del río Sayté 7.06.09

<b>Fecha 7.06.09</b>	
Ancho del río en metros	
10.80	
<b>Profundidad a cada metro</b>	
Distancia (m)	Profundidad (cm)
1	18.00
2	20.50
3	36.50
4	47.00
5	39.50
6	38.00
7	46.00
8	57.00
9	43.00

Fuente: Andrés Scheel

Figura 15: Área transversal río Sayté 7.6.09



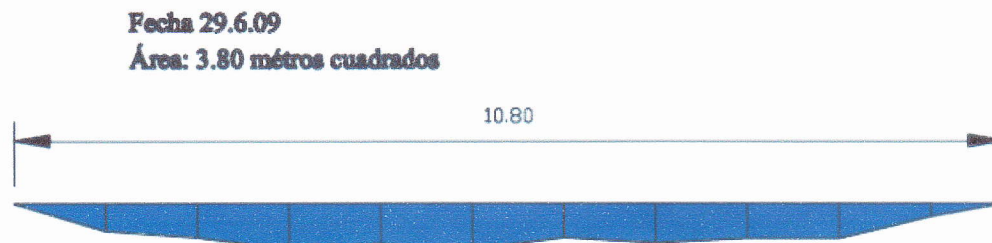
Fuente: Andrés Scheel

Tabla 27: Área transversal del río Sayté 29.06.09

<b>Fecha 29.06.09</b>	
Ancho del río en metros	
10.80	
<b>Profundidad a cada metro</b>	
Distancia (m)	Profundidad (cm)
1	30.00
2	37.00
3	50.00
4	44.00
5	50.00
6	37.00
7	43.00
8	38.00
9	37.00
10	14.00

Fuente: Andrés Scheel

Figura 16: Área transversal río Sayté 29.6.09



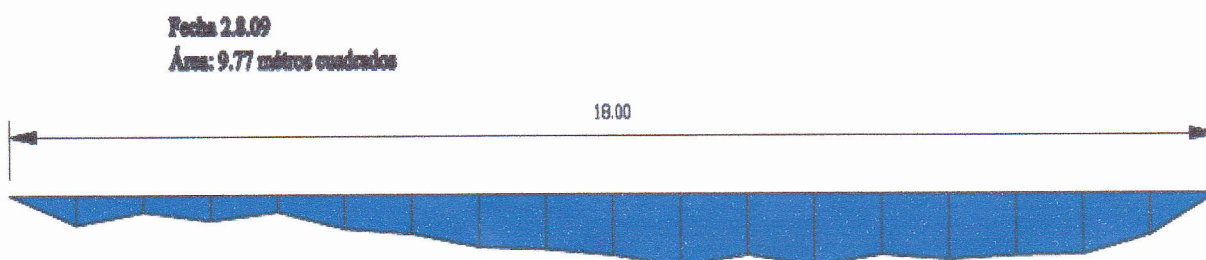
Fuente: Andrés Scheel

Tabla 28: Área transversal del río Sayté 2.08.09

<b>Fecha 2.08.09</b>	
Ancho del río en metros	
18.00	
<b>Profundidad a cada metro</b>	
Distancia (m)	Profundidad (cm)
1	35.00
2	20.00
3	30.00
4	20.00
5	40.00
6	46.00
7	62.00
8	65.00
9	72.00
10	85.00
11	79.00
12	85.00
13	72.00
14	78.00
15	73.00
16	72.00
17	49.00

Fuente: Andrés Scheel

Figura 17: Área transversal río Sayté 2.8.09



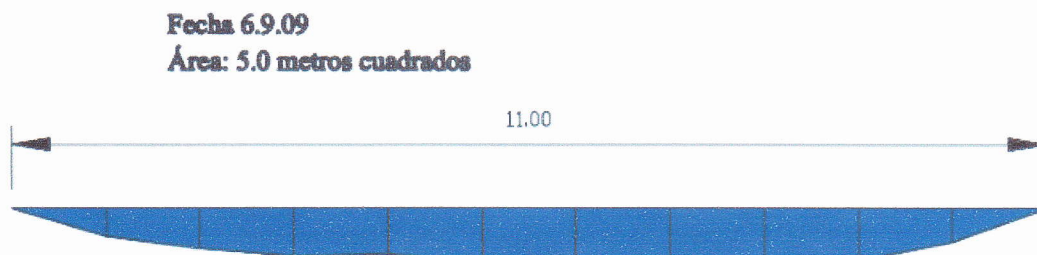
Fuente: Andrés Scheel

Tabla 29: Área transversal del río Sayté 6.09.09

<b>Fecha 6.09.09</b>	
Ancho del río en metros	
11.00	
<b>Profundidad a cada metro</b>	
Distancia (m)	Profundidad (cm)
1	30.00
2	43.00
3	51.00
4	49.00
5	57.00
6	60.00
7	65.00
8	53.00
9	56.00
10	36.00

Fuente: Andrés Scheel

Figura 18: Área transversal río Sayté 6.9.09



Fuente: Andrés Scheel



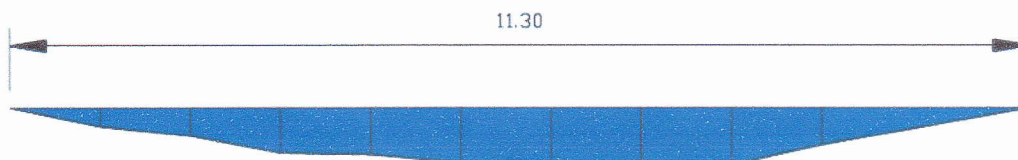
Tabla 30: Área transversal del río Sayté 20.09.09

<b>Fecha 20.09.09</b>	
Ancho del río en metros	
11.30	
<b>Profundidad a cada metro</b>	
Distancia (m)	Profundidad (cm)
1	21.00
2	31.00
3	5.00
4	52.00
5	61.00
6	64.00
7	6.00
8	63.00
9	41.00

Fuente: Andrés Scheel

Figura 19: Área transversal río Sayté 20.9.09

**Fecha 20.9.09**  
**Área: 4.70 metros cuadrados**



Fuente: Andrés Scheel

d. **Caudales.** Los caudales se obtuvieron multiplicando la velocidad promedio por el área transversal para cada día respectivamente. Con los datos se obtuvo el caudal promedio general.

Los resultados son los siguientes:

Tabla 31: Caudales promedio por fecha

	<b>Velocidad</b>	<b>Área</b>	<b>Caudal</b>
	<i>m/s</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	<i>m<sup>3</sup>/s</i>
Fecha 17.05.09	0.48	4.55	2.16
Fecha 7.06.09	0.33	3.70	1.22
Fecha 29.06.09	0.66	3.80	2.49
Fecha 2.08.09	1.20	9.77	11.73
Fecha 6.09.09	0.80	5.00	3.98
Fecha 20.09.09	0.75	4.70	3.54
<b>Promedios</b>	<b>0.70</b>	<b>5.25</b>	<b>4.19</b>

Fuente: Andrés Scheel

<b>Caudal general (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>4.19</b>
---	-------------

Debido a que en la fecha del 2.08.09 hubo una crecida del río, se prefirió omitir los datos de ésta fecha para obtener un caudal general más apegado al promedio y así poder corroborar de mejor manera los caudales obtenidos con las Isoyetas y el área de las cuencas.

Los resultados son los siguientes:

Tabla 32: Caudales promedio por fecha sin crecidas

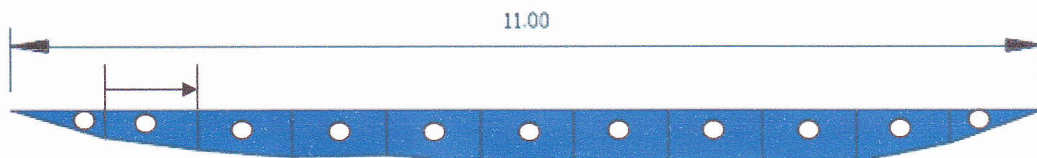
	<b>Velocidad</b>	<b>Área</b>	<b>Caudal</b>
	<i>m/s</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	<i>m<sup>3</sup>/s</i>
Fecha 17.05.09	0.48	4.55	2.16
Fecha 7.06.09	0.33	3.70	1.22
Fecha 29.06.09	0.66	3.80	2.49
Fecha 6.09.09	0.80	5.00	3.98
Fecha 20.09.09	0.75	4.70	3.54
<b>Promedios</b>	<b>0.60</b>	<b>4.35</b>	<b>2.68</b>

Fuente: Andrés Scheel

<b>Caudal general (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>2.68</b>
---	-------------

- e. **Discusión y conclusión.** Un método que se usa en la práctica para medir caudales en ríos consta de dividir el río en áreas transversales a una distancia constante perpendicular al flujo como mostrado por la flecha de la Figura 20. La velocidad se mide con un aparato especial que consta de una hélice y calcula la velocidad del agua según la cantidad de revoluciones de la misma en el tiempo. La velocidad promedio para cada área transversal se mide aproximadamente a 60% de la altura desde el fondo del río como mostrado por los puntos blancos de la misma figura 20. El caudal total se obtiene con la sumatoria de la multiplicación de cada área con su respectiva velocidad.

Figura 20: Medición empírica del caudal



Fuente: Andrés Scheel

En el caso de las mediciones hechas en campo en este trabajo no se contaba con el aparato para medir la velocidad por lo que se usó un flotador en la superficie del río.

Debido a que no se podía mantener el flotador exactamente sobre cada área transversal se optó por obtener una velocidad promedio para un área completa transversal del río.

Naturalmente esto resulta en datos menos exactos pero más conservadores ya que se usa una velocidad menor, por estar las mediciones en la superficie del agua, para el área transversal total del río.

Este resultado representa aproximadamente el caudal garantizado del río Sayté para 2 a 3 meses según lo calculado con las Isoyetas lo cual demuestra que a pesar de ser datos conservadores, los valores de cantidad de caudal son altos por la época que fueron tomados (invierno). Es seguro decir que los caudales que se obtuvieron empíricamente son los caudales relativamente grandes del río siendo el mayor el del día 2. 08. 09. Así mismo se ve que este caudal es aproximadamente igual en magnitud al caudal de diseño que se usa para el cálculo con regulación que es el caudal de diseño máximo por lo que los diseños son conservadores y tienen un gran margen o factor de seguridad respecto a los caudales reales. Los caudales obtenidos por el método de Turc son conservadores respecto a los caudales obtenidos en campo.



## V. SELECCIÓN DE ESQUEMAS

Se usaron las colindancias de la finca “El Paraíso de Secanquim” como limitante para la obra civil y uso de los ríos.

Se pensaron en muchas y diferentes propuestas de esquemas. Por ejemplo hacer múltiples presas sobre el río Sayté que es el que tiene mayor longitud dentro de la finca. Este esquema se descartó por el costo tan elevado de hacer múltiples presas relativamente grandes con caídas pequeñas.

Otra propuesta planteada era hacer una gran presa dentro de la finca para captar y elevar el nivel del río Chisay y otra presa similar para captar el río Sayté. La idea era hacer un canal desde cada presa para un desarenador común y tirar ambos caudales simultáneamente a la turbina. Este esquema se descartó por la dimensión y el costo de las dos presas.

Así, descartando esquemas que a simple vista se notaban demasiado costosos respecto a la generación, se llegó a los tres esquemas posibles para observar el comportamiento y poder definir según la relación costo/generación, cuál sería la mejor opción para darle un rumbo al proyecto de ser tal el caso.

El esquema 1 es un tipo de central hidroeléctrica conocido como central con embalse de reserva con aprovechamiento por derivación. El tipo de presa es por gravedad. Por su potencia instalada y caída se define como una mini central de baja caída. Usando solo el río Sayté y una presa mediana, se tiene un canal, un desarenador, una cámara de presión, una caída con tubería forzada y cuarto de máquinas.

El esquema 2 es igual que el esquema 1, con la diferencia de no contar con una presa o embalse por lo que es una mini central hidroeléctrica de pasada con baja caída.

Hacer esquemas similares usando solo el río Chisay no es posible por la poca longitud que tiene éste dentro de la finca. De igual manera es infructuoso hacer esto con la quebrada Maquila por su poco caudal.

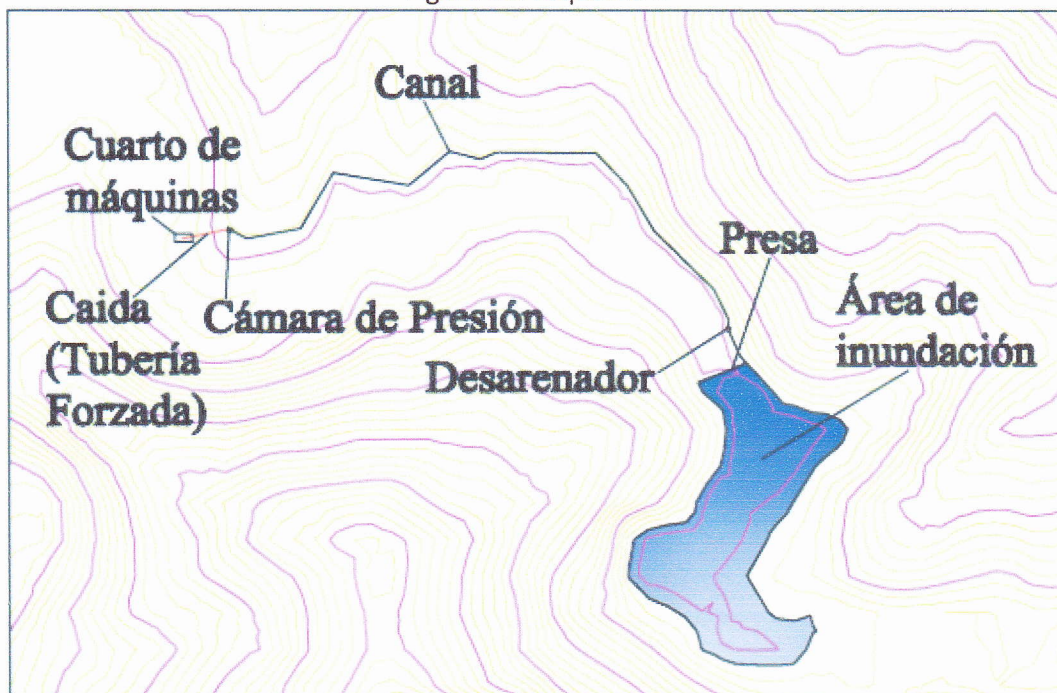
Hacer esquemas similares usando solo el río Chisay no es posible por la poca longitud que tiene éste dentro de la finca. De igual manera es infructuoso hacer esto con la quebrada Maquila por su poco caudal.

El esquema 3 que a simple vista se miraba que sería el más costoso de los tres, se tomó en cuenta porque embalsaba con una gran presa por gravedad los caudales de los 2 ríos y la quebrada, Chisay, Sayté y Maquila respectivamente. Este tipo de central hidroeléctrica sería de embalse con el cuarto de máquinas al pie de la presa y por su potencia instalada y caída es una pequeña central de baja caída.

Estos tres esquemas son los que se analizan usando cuatro diferentes caudales de diseño para ver el comportamiento de las estructuras, los costos y los ingresos, al mismo tiempo que sobresalían las ventajas y desventajas de cada una.

## VI. ESQUEMA 1 (Central con embalse y con aprovechamiento por derivación)

Figura 21: Esquema 1



Fuente: Andrés Scheel

El esquema 1 tiene toda la obra civil dentro de la finca "El Paraíso de Secanquim" y consta de una presa que provoca un área de inundación, un canal que conduce el caudal, un desarenador, una cámara de presión, tubería de acero para la caída y el cuarto de máquinas. Todo se diseñó con curvas de nivel a cada 5 metros.

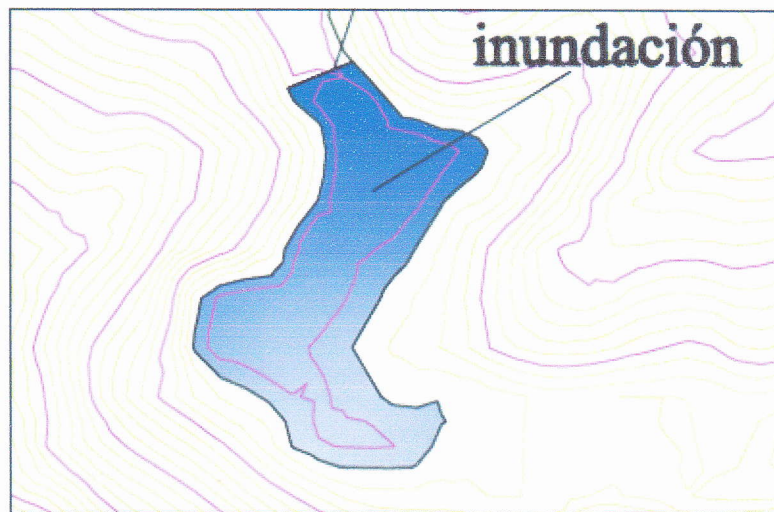
### A. Área de inundación

El área de inundación queda en mayor parte dentro de la Finca "El Paraíso de Secanquim". Hay una pequeña parte que queda dentro de la finca vecina "Codema".

El área de inundación es de 20,166.597 metros cuadrados, es decir 0.02 Km cuadrados y una profundidad de 5 metros aproximadamente. Con estas dimensiones se tiene un volumen de embalse de 100,832.99 metros cúbicos que es mayor al requerido para usar un caudal de diseño con regulación que se definirá más adelante (30,715.20 metros cúbicos requeridos que es la acumulación durante 20 horas del caudal garantizado 95% del tiempo).



Figura 22: Área de inundación esquema 1

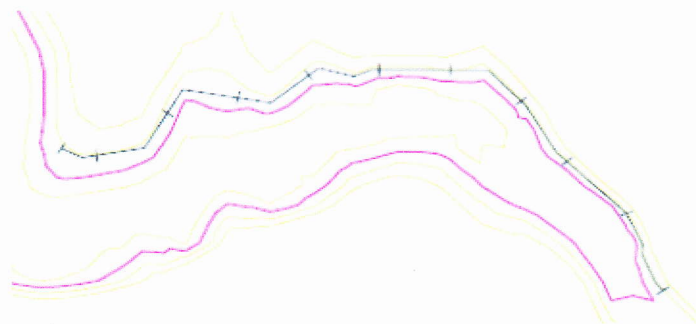


Fuente: Andrés Scheel

**B. Movimiento de tierras y accesos a la obra**

Para entrar a la obra se necesita ampliar un camino ya existente a través de la finca, adicionalmente se necesita hacer un camino de 10.00 metros de ancho tanto para ubicar el canal como para paso de camiones que transportaran los materiales.

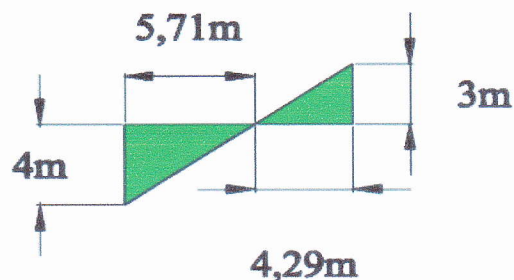
Figura 23: Vista en planta y área transversal típica excavación esquema 1



Fuente: Andrés Scheel



Figura 24: Sección típica de excavación y relleno esquema 1



Fuente: Andrés Scheel

### 1. Costos

Tabla 33: Costo de movimientos de tierra esquema 1

Movimientos de tierra esquema 1						
Excavación área transversal típica	Relleno área transversal típica	longitud (m)	Total movimiento (m3)	Costo por m3	Entrada de acceso (\$)	Total (\$)
6.43	11.43	557.66	9958.69	\$10.00	12500.00	\$112,086.92

Fuente: Andrés Scheel

### C. Caudales de diseño

Para el esquema 1 se toman caudales de diseño con base al río Sayte. Los criterios de diseño son los siguientes:

Tabla 34: Criterios de caudales de diseño esquema 1

$Q_{med}$
$Q = 0.8 * Q_{med}$
$Q = 1.2 * Q_{med}$
$Q = 6 * Q_{95\%}$

Fuente: Andrés Scheel

Se toma el caudal medio con una variación positiva y también negativa de un 20% ya que son parámetros que se usan internacionalmente para definir el caudal de diseño, también se toma el criterio de 6 veces el caudal garantizado para el 95% del tiempo que es un criterio que se usa en Guatemala, en este último se toma en cuenta una regulación diaria de 20 horas para liberar 4 horas el caudal de diseño por lo que se requiere de un embalse regulador o presa.

Los caudales de diseño son los siguientes:

Tabla 35: Resultados de criterios de diseño de caudales del esquema 1

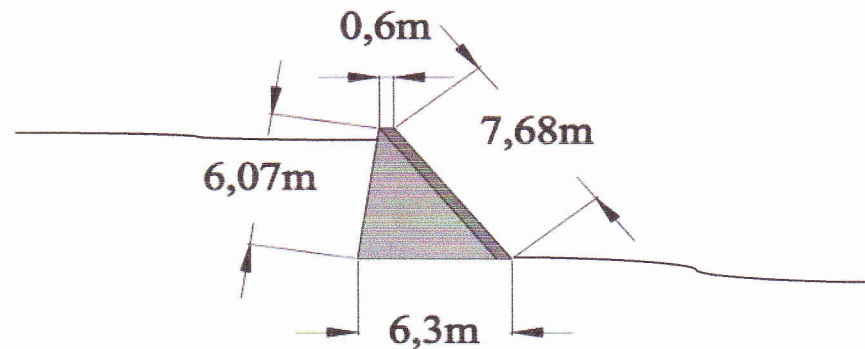
Caudal Sayte (m3/s)	
Qmed	1.42
Q:=0.8*Qmed	1.13
Q:=1.2*Qmed	1.70
Q=6*Q95%	2.56

Fuente: Andrés Scheel

#### D. Presa

La presa es por gravedad y tiene una longitud de 43.18 metros y una altura de 6 metros. El área de la presa transversal al río es rectangular por lo que la dimensión es de 259.08 metros cuadrados. Su ubicación se planteó en una de las partes más estrechas del río y la altura se definió tomando en cuenta y evitando en la mayor medida posible inundaciones fuera de la finca “El Paraíso de Secanquim”.

Figura 25: Perfil de la presa esquema 1



Fuente: Andrés Scheel

Para fines de cuantificación de costo aproximado, el cuerpo de la presa se divide en dos partes, la losa vertedora que tiene un espesor de 0.60 metros y es de concreto más resistente (250 kg/cm<sup>2</sup>) y el núcleo que es de concreto menos resistente (175 kg/cm<sup>2</sup>). La losa vertedora tiene una doble malla de acero de varillas #4 separadas en ambos sentidos en 0.25 metros, que es principalmente para resistir dilataciones por cambios de temperatura y vibraciones. El núcleo tiene igualmente varillas #4 separadas tridimensionalmente 0.30 metros. La proporciones de pendiente río arriba son (X/Y) 0.15/1.00 y río abajo son (X/Y) 0.8/1.00.

## 1. Costos

Tabla 36: Costos de la presa esquema 1

Presa esquema 1						
Área transversal losa vertedora (m <sup>2</sup> )	Volumen área vertedora (m <sup>3</sup> )	Costo (\$) Concreto de 250 kg/cm <sup>2</sup>	Metros lineales de acero	Cantidad de varillas	Costo acero	Costo total losa vertedora(\$)
3.60	155.45	27203.40	5407.68	901.28	4927.26	32130.66
Área transversal del núcleo (m <sup>2</sup> )	Volumen del núcleo (m <sup>3</sup> )	Costo (\$) Concreto de 175 kg/cm <sup>2</sup>	Metros lineales de acero	Cantidad de varillas	Costo acero	Costo total del núcleo (\$)
17.10	738.38	108910.76	19047.55	3174.59	17355.38	126266.14
					<b>Costo total de la presa (\$)</b>	<b>\$158,396.80</b>

Fuente: Andrés Scheel

## E. Canales

El canal sí varía significativamente según el caudal de diseño por lo tanto se dimensionaron canales rectangulares, trapezoidales y circulares para cada caudal de diseño de este esquema, por motivos de simpleza de construcción se escogió el canal rectangular como el indicado para el proyecto sin embargo se presenta los resultados de los demás canales. Para el diseño se tomó una rugosidad del hormigón de 0.017 y una pendiente de 0.3% a lo largo de todo el canal. En el esquema 1 el canal tiene una longitud de 557.66 metros y con la pendiente de 0.3% y considerando que el canal inicia 0.50 metros por debajo de la corona de la presa se tiene que hay una pérdida de altura de 2.17 metros por la longitud del canal respecto a la corona de la presa.

Dimensiones de los canales según su geometría:

Tabla 37: Canal rectangular esquema 1

Canal rectangular		caudal real
Ancho	tirante + 30cm	
1.3	1	1.422
1.3	0.9	1.15
1.3	1.1	1.69
1.5	1.3	2.61

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 38: Capacidad de paso de los canales rectangulares esquema 1

Para ancho (b) de 1.3m		Para ancho (b) de 1.5m	
tirante	Caudal	tirante	Caudal
0.15	0.15	0.25	0.43
0.3	0.44	0.5	1.09
0.45	0.78	0.75	1.83
0.6	1.16	1	2.61
0.75	1.55	1.25	3.42
0.9	1.97	1.5	4.24
1.05	2.39	1.75	5.07
1.2	2.83	2	5.91
1.35	3.26	2.25	6.75
1.5	3.7	2.5	7.60

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 39: Canal trapezoidal esquema 1

Canal trapezoidal		caudal real
Ancho abajo	tirante + 30cm	
0.8	0.923	1.41
0.8	0.85	1.12
0.8	0.985	1.7

Fuente: Andrés Scheel

La pendiente del trapecio es de 1:1

Tabla 40: Capacidad de paso del canal trapezoidal esquema 1

Para ancho (b) abajo 0.8m	
tirante	Caudal
0.1	0.055
0.2	0.179
0.3	0.36
0.4	0.61
0.5	0.93
0.6	1.31
0.7	1.77
0.8	2.31
0.9	2.93
1	3.63

Fuente: Andrés Scheel



Tabla 41: Canal circular esquema 1

Canal circular		caudal real
diámetro	Tirante	
1.2	0.88	1.43
1.1	0.8	1.123
1.3	0.93	1.712

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 42: Capacidad de paso para los canales circulares esquema 1

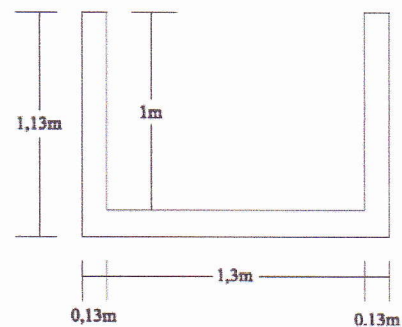
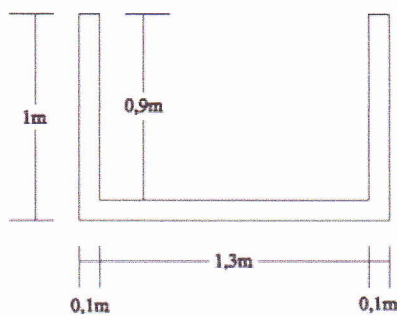
Para diámetro 1.1		Para diámetro 1.2		Para diámetro 1.3	
tirante	Caudal	tirante	Caudal	tirante	Caudal
0.11	0.0324	0.12	0.041	0.13	0.0505
0.22	0.1172	0.24	0.1478	0.26	0.1829
0.33	0.252	0.36	0.3179	0.39	0.3936
0.44	0.44	0.48	0.5552	0.52	0.6873
0.55	0.6474	0.6	0.8165	0.65	1.01
0.66	0.8587	0.72	1.083	0.78	1.34
0.77	1.063	0.84	1.3408	0.91	1.6598
0.88	1.283	0.96	1.6174	1.04	2.002
0.99	1.39	1.08	1.7533	1.17	2.17
1.023	1.4011	1.116	1.767	1.209	2.1875
1.1	1.295	1.2	1.633	1.3	2.02

Fuente: Andrés Scheel

Dimensiones de los canales rectangulares para los diferentes caudales de diseño tomando el ancho de los muros de 10cm o 0.13(h) según el mayor.

Figura 26: Área transversal de canales rectangulares según caudal de diseño esquema 1

$$Q = (0.8)Q_{\text{medio}}$$

$$Q_{\text{medio}}$$


$$Q=(1.2)Q_{\text{medio}}$$

$$Q=6(Q_{95\%})$$

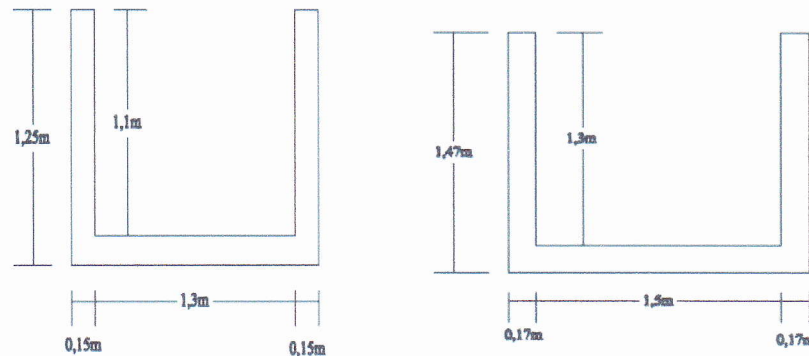


Figura 26: Área transversal de canales rectangulares según caudal de diseño esquema 1 (continuación). Fuente: Andrés Scheel

## 1. Costos

Tabla 43: Costos de los canales rectangulares según su caudal de diseño esquema 1

Esquema 1							
Caudal de diseño	Longitud del canal (m)	Área (m <sup>2</sup> ) transversal	Volumen (m <sup>3</sup> ) Concreto	Costo (\$) Concreto de 250 kg/cm <sup>2</sup>	Total qq de acero	Costo total de acero (\$)	Costo total del canal (\$)
<b>Q<sub>med</sub></b>	557.66	0.463	258.20	\$45,184.40	284.02	\$10,868.95	<b>\$56,053.35</b>
<b>Q:=0.8*Q<sub>med</sub></b>	557.66	0.330	184.03	\$32,204.87	202.43	\$7,746.77	<b>\$39,951.63</b>
<b>Q:=1.2*Q<sub>med</sub></b>	557.66	0.570	317.87	\$55,626.59	349.65	\$13,380.78	<b>\$69,007.36</b>
<b>Q=6*Q<sub>95%</sub></b>	557.66	0.755	421.03	\$73,680.83	463.14	\$17,723.66	<b>\$91,404.49</b>

Fuente: Andrés Scheel

## F. Desarenador

El desarenador se colocó relativamente al inicio del canal para que no se fuera a saturar de sedimentos y sacarlos antes del sistema. Se colocó en un área topográficamente ventajoso para propiciar la limpieza y sobre una parte del terreno donde la estructura no corre peligro por deslaves. Se estima que un 5% del caudal son sólidos por estar en un área montañosa.

El desarenador será de tipo intermitente, es decir que hay que limpiarlo cada cierto tiempo dependiendo de la cantidad de sedimentos que tenga el río. La estructura es una cámara de sedimentación rectangular con el nivel del suelo más bajo que el del canal y con forma de embudo. En el fondo tiene una compuerta para el lavado de los sedimentos, tiene una compuerta que regula la entrada de agua y evitar turbulencia y la salida es un vertedero en alto que evita que suban los sedimentos. La velocidad del agua disminuye en esta sección notablemente.

**1. Costo.** El costo se tomó de un proyecto de dimensiones parecidas respecto al caudal y ubicación remota por lo que se tiene un costo de \$30,000.00.

#### **G. Cámara de presión**

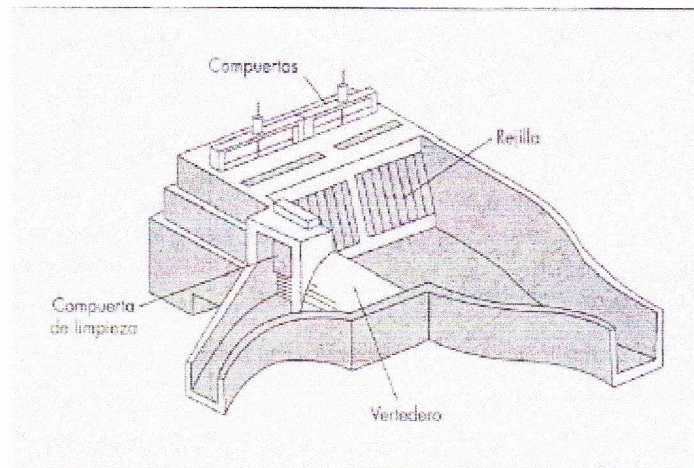
Prácticamente es un tanque al final del canal en donde al igual que el desarenador se disminuye la velocidad del agua notablemente y la función principal es evitar que entre aire a la tubería forzada al igual que controlar el ingreso de caudal. Es decir regular el aumento o disminución abrupta de la necesidad de caudal de los generadores evitando el golpe de ariete. El tanque de presión esta conectado al canal por medio de una transición de la cual el agua pasa a la tubería de presión a través de una rejilla que evita la entrada de elementos sólidos flotantes.

Los excesos de agua en la cámara de presión se liberan a través de un vertedero y tiene que tener una reserva adecuada de agua para el aumento de velocidad de las turbinas.

Para su diseño se tiene que tener claro que el nivel de agua nunca puede bajar al nivel de la entrada de agua a la tubería forzada.



Figura 27: Esquema básico de la cámara de presión para el esquema 1



Fuente: Kaveshnikov

**1. Costos.** Del mismo estudio con caudales similares y ubicación remota se tomó el costo de la cámara de presión para este estudio y es de \$50,000.00.

#### H. Tubería forzada

Para el diseño de la tubería forzada se tomó como criterio una velocidad del agua de 2m/s a 3m/s aproximadamente que es según la experiencia es la velocidad óptima para tener una relación adecuada de diámetro respecto a costos. La tubería tiene apoyos a lo largo que permiten el desplazamiento por elongaciones producidas por variaciones de temperatura y vibraciones.

Tabla 44: Coeficiente para cálculo de pérdidas por fricción tubería de acero

Coeficiente para cálculo de pérdidas por fricción tubería de acero						
Diámetro	0.8	1	1.2	1.5	1.8	2
Coeficiente	0.00110000	0.00091709	0.000734198	0.00055982	0.00044895	0.00039532

Fuente: Kaveshnikov



Tabla 45: Dimensiones, velocidad y perdidas tubería forzada esquema 1

Sayté tubería forzada Esquema 1				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
	1.42	1.13	1.70	2.56
diámetro (m)	0.85	0.85	1.00	1.00
velocidad (m/s)	2.50	2.00	2.15	3.25
Longitud (m)	40.00	40.00	40.00	40.00
pérdidas (m)	0.28	0.18	0.17	0.39

Fuente: Andrés Scheel

**1. Costos.** El costo de la tubería forzada depende entre otras cosas de su grosor que a su vez depende de la presión y el peso que soporta. El espesor es función de la altura, pérdidas y el diámetro.

Tabla 46: Espesor, peso y costo de tubería forzada esquema 1

Sayte tubería forzada Esquema 1				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
	1.42	1.13	1.70	2.56
diámetro (m)	0.85	0.85	1.00	1.00
velocidad (m/s)	2.50	2.00	2.15	3.25
Longitud (m)	40.00	40.00	40.00	40.00
pérdidas (m)	0.28	0.18	0.17	0.39
Altura (m)	10.06	10.15	10.16	9.94
Espesor tubería (m)	0.0114	0.0114	0.0128	0.0126
Peso de la tubería (Kg)	9516.84	9577.55	12652.13	12431.39
<b>Costo (\$7/kg)</b>	<b>\$66,617.89</b>	<b>\$67,042.86</b>	<b>\$88,564.91</b>	<b>\$87,019.73</b>

Fuente: Andrés Scheel

**I. Casa de máquinas.** La casa de máquinas alberga la turbina y el generador entre otras cosas. Es un edificio sencillo de block de 10x10 metros, techo de lámina y piso de concreto.

Figura 28: Ejemplo similar de la casa de máquinas esquema 1



Fuente: ESHA (European Small Hydropower Association)

**1. Costos.** El costo de la casa de máquinas no varía de tamaño con la variación de caudales de diseño. Su costo es de \$10,000.00 es decir, \$100 por m<sup>2</sup> por la ubicación remota.

#### J. Costos de equipamiento

El equipamiento de la casa de maquinas para este esquema sería una turbina Kaplan acoplada a un generador asíncrono por la poca caída y gran caudal, si varía según los caudales de diseño ya que depende directamente de la potencia.

Tabla 47: Costo de equipamiento esquema 1

Costo por equipamiento Sayté Esquema 1				
Caudales	Q <sub>med</sub>	Q:=0.8*Q <sub>med</sub>	Q:=1.2*Q <sub>med</sub>	Q=6*Q <sub>95%</sub>
	1.42	1.13	1.70	2.56
Potencia (Kw)	118.72	95.91	143.95	212.24
Costo (850US/Kw)	\$100,907.83	\$81,521.08	\$122,359.06	\$180,402.98

Fuente: Andrés Scheel

#### K. Subestación e interconexión

La subestación básicamente es para elevar o bajar el voltaje y así poder interconectarse a la red nacional. El precio promedio es de \$80,000.00 por Mw de conversión. Adicionalmente se tiene que llegar al lugar más cercano para poder interconectarse, para este proyecto el lugar para interconectarse es un pueblo que

esta a 5km. El costo por Km es de aproximadamente \$25,000.00 para un voltaje de 13.8 KV.

**1. Costos.** El costo de la interconexión es igual para todos los esquemas y sus respectivos caudales de diseño sin embargo el costo de transformación varia según el esquema y el caudal de diseño. Éste costo se da a continuación en el resumen de costos totales.

Interconexión (5km)	\$125,000.00
---------------------	--------------

#### L. Resumen de costos totales por caudal de diseño

Cada caudal de diseño tiene costos diferentes en estructuras que son impactadas en gran medida por las variaciones del mismo por lo tanto los costos varían acordeamente. Las estructuras que cambian significativamente de costo según el caudal de diseño son los canales, la tubería forzada, el equipamiento del cuarto de máquinas y el equipo para la transformación del voltaje. Adicionalmente en los costos se incluye el recurso humano como un porcentaje del costo de la obra física.

Tabla 48: Resumen de costos para el caudal medio esquema 1

Costos totales esquema 1 con Q medio		Porcentaje del costo
Ingresos y movimientos de tierra	\$112,086.92	10.26%
Presa	\$158,396.80	14.50%
Canal	\$56,053.35	5.13%
Desarenador	\$30,000.00	2.75%
Cámara de presión	\$50,000.00	4.58%
Tubería forzada	\$66,617.89	6.10%
Cuarto de máquinas	\$10,000.00	0.92%
Equipamiento	\$100,907.83	9.24%
Transformación de Voltaje (\$80,000/Mw)	\$9,497.21	0.87%
Interconexión (5km)	\$125,000.00	11.44%
Ingeniería y administración (12%)	\$86,227.20	7.89%
Mano de obra (40%)	\$287,424.00	26.32%
<b>TOTAL</b>	<b>\$1,092,211.19</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Andrés Scheel



Tabla 49: Resumen de costos para el 80% del caudal medio esquema 1

<b>Costos totales esquema 1 con (0.8)Q medio</b>	<b>Porcentaje del costo</b>	
Ingresos y movimientos de tierra	\$112,086.92	10.82%
Presa	\$158,396.80	15.29%
Canal	\$39,951.63	3.86%
Desarenador	\$30,000.00	2.90%
Cámara de presión	\$50,000.00	4.83%
Tubería forzada	\$67,042.86	6.47%
Cuarto de máquinas	\$10,000.00	0.97%
Equipamiento	\$81,521.08	7.87%
Transformación de Voltaje (\$80,000/Mw)	\$7,672.57	0.74%
Interconexión (5km)	\$125,000.00	12.06%
Ingeniería y administración (12%)	\$81,800.62	7.89%
Mano de obra (40%)	\$272,668.75	26.32%
<b><u>TOTAL</u></b>	<b>\$1,036,141.23</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 50: Resumen de costos para el 120% del caudal medio esquema 1

<b>Costos totales esquema 1 con (1.2)Q medio</b>	<b>Porcentaje del costo</b>	
Ingresos y movimientos de tierra	\$112,086.92	9.49%
Presa	\$158,396.80	13.41%
Canal	\$69,007.36	5.84%
Desarenador	\$30,000.00	2.54%
Cámara de presión	\$50,000.00	4.23%
Tubería forzada	\$88,564.91	7.50%
Cuarto de máquinas	\$10,000.00	0.85%
Equipamiento	\$122,359.06	10.36%
Transformación de Voltaje (\$80,000/Mw)	\$11,516.15	0.98%
Interconexión (5km)	\$125,000.00	10.58%
Ingeniería y administración (12%)	\$93,231.74	7.89%
Mano de obra (40%)	\$310,772.48	26.32%
<b><u>TOTAL</u></b>	<b>\$1,180,935.42</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Andrés Scheel



Tabla 51: Resumen de costos para 6X el caudal garantizado 95% del tiempo esquema 1

Costos totales esquema 1 con 6xQ95%		Porcentaje del costo
Ingresos y movimientos de tierra	\$112,086.92	8.56%
Presa	\$158,396.80	12.10%
Canal	\$91,404.49	6.98%
Desarenador	\$30,000.00	2.29%
Cámara de presión	\$50,000.00	3.82%
Tubería forzada	\$87,019.73	6.65%
Cuarto de máquinas	\$10,000.00	0.76%
Equipamiento	\$180,402.98	13.78%
Transformación de Voltaje (\$80,000/Mw)	\$16,979.10	1.30%
Interconexión (5km)	\$125,000.00	9.55%
Ingeniería y administración (12%)	\$103,354.80	7.89%
Mano de obra (40%)	\$344,516.01	26.32%
<b>TOTAL</b>	<b>\$1,309,160.84</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Andrés Scheel

### M. Esquema hidroenergético

1. **Caída.** La altura se obtiene tomando la altura total desde la corona de la presa hasta la altura de la turbina. A esta altura se le restan 0.50 metros que es la altura por debajo de la corona que empieza el canal, se le resta la altura que se pierde por la pendiente de 0.3% a lo largo de todo el canal y por último se resta la altura que se pierde por la fricción en la tubería forzada.

2. **Potencia.** La potencia se obtiene multiplicando la altura final, la gravedad ( $9.81\text{m/s}^2$ ), el caudal y la eficiencia de la turbina y generador (se tomó por criterio una eficiencia conjunta de 85%).

Tabla 52: Potencia según el caudal esquema 1

<b>Sayté Esquema 1</b>				
Caudales	<b>Qmed</b>	<b>Q:=0.8*Qmed</b>	<b>Q:=1.2*Qmed</b>	<b>Q=6*Q95%</b>
	1.42	1.13	1.70	2.56
Altura (m)	10.06	10.15	10.16	9.94
Potencia (Kw)	118.72	95.91	143.95	212.24

Fuente: Andrés Scheel

**3. Energía.** Para la medición de la energía se tomó la producción de energía en intervalos de 20 días con el caudal promedio y la potencia promedio para ese intervalo. Se sumó la energía hasta llegar al caudal de diseño como caudal máximo y se tomó la energía generada por caudales mayores como la energía generada por el caudal de diseño en esos intervalos de tiempo ignorando la generación adicional.

Tabla 53: Producción de energía total anual del río Sayté para el esquema 1

<b>Producción de energía río Sayté para el esquema 1</b>							
Días	Caudal	Diferencia de días	Caudal promedio	Potencia promedio del intervalo (KW)	Energía del intervalo (KWH)	sumatoria de días	sumatoria de energía (kw/h)
365	0.30	20.00	0.32	27.20	13057.12	20.00	13057.12
345	0.35	20.00	0.37	31.33	15036.54	40.00	28093.66
325	0.40	20.00	0.43	36.08	17316.03	60.00	45409.69
305	0.46	20.00	0.49	41.54	19941.08	80.00	65350.78
285	0.53	20.00	0.57	47.84	22964.09	100.00	88314.86
265	0.61	20.00	0.66	55.09	26445.37	120.00	114760.23
245	0.70	20.00	0.76	63.45	30454.40	140.00	145214.63
225	0.81	20.00	0.87	73.06	35071.19	160.00	180285.82
205	0.93	20.00	1.00	84.14	40387.87	180.00	220673.69
185	1.07	20.00	1.15	96.90	46510.54	200.00	267184.22
165	1.23	20.00	1.33	111.59	53561.38	220.00	320745.61
145	1.42	20.00	1.53	128.50	61681.11	240.00	382426.72
125	1.64	20.00	1.76	147.98	71031.77	260.00	453458.49
105	1.89	20.00	2.03	170.42	81799.95	280.00	535258.44
85	2.17	20.00	2.34	196.25	94200.56	300.00	629459.00
65	2.50	20.00	2.69	226.00	108481.06	320.00	737940.06
45	2.88	20.00	3.10	260.26	124926.44	340.00	862866.50
25	3.32	20.00	3.57	299.72	143864.88	360.00	1006731.38
5	3.82	5.00	3.89	326.60	39191.73	365.00	1045923.11
0	3.95	0.00	1.98	166.18	0.00	365.00	1045923.11

Fuente: Andrés Scheel



Tabla 54: Energía total anual producida por cada caudal de diseño

Energía según el caudal Esquema 1				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
	1.42	1.13	1.70	2.56
<b>Energía total en kw año</b>	761,254.53	637,670.94	816,096.37	905,646.28

Fuente: Andrés Scheel

4. **Ingresos.** Los Ingresos son por concepto de venta de energía, por venta de potencia (ya que se tiene presa y se puede garantizar la potencia todo el año) y por venta de bonos en concepto de energía limpia. La venta de energía se analizó con 7, 8, 9 y 10 centavos de dólar por Kwh de generación. La potencia se calculó con un precio de 7 dólares por kw de potencia por mes durante 12 meses. Los bonos son de 8 dólares por Mwh de generación durante un año.

Tabla 55: Ingresos anuales según el caudal de diseño, esquema 1

Ingresos Sayté Esquema 1				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
	1.42	1.13	1.70	2.56
<b>Energía total kw año</b>	761,254.53	637,670.94	816,096.37	905,646.28
7 c/kWh	\$53,287.82	\$44,636.97	\$57,126.75	\$63,395.24
8 c/kWh	\$60,900.36	\$51,013.68	\$65,287.71	\$72,451.70
9 c/kWh	\$68,512.91	\$57,390.38	\$73,448.67	\$81,508.17
10 c/kWh	\$76,125.45	\$63,767.09	\$81,609.64	\$90,564.63
<b>Potencia</b>				
7 \$/kw mes	\$9,972.07	\$8,056.20	\$12,091.95	\$17,828.06
<b>Bonos</b>				
8 \$/Mwh	\$6,090.04	\$5,101.37	\$6,528.77	\$7,245.17
<b>TOTALES</b>				
7 c/kWh	\$69,349.92	\$57,794.53	\$75,747.47	\$88,468.47
8 c/kWh	\$76,962.47	\$64,171.24	\$83,908.43	\$97,524.93
9 c/kWh	\$84,575.01	\$70,547.95	\$92,069.40	\$106,581.39
10 c/kWh	\$92,187.56	\$76,924.66	\$100,230.36	\$115,637.86
<b>Diferencia Porcentual</b>				
	-20.28%	-33.48%	-13.32%	100.00%

Fuente: Andrés Scheel

## N. Análisis del aumento del costo de las estructuras respecto al aumento del ingreso

Tabla 56: Aumento de ingresos con base al ingreso más pequeño, esquema 1

Aumento de ingresos con base al ingreso más pequeño, esquema 1				
	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
7 c/kWh	\$11,555.39	\$0.00	\$17,952.94	\$30,673.93
8 c/kWh	\$12,791.22	\$0.00	\$19,737.19	\$33,353.69
9 c/kWh	\$14,027.06	\$0.00	\$21,521.44	\$36,033.44
10 c/kWh	\$15,262.89	\$0.00	\$23,305.70	\$38,713.19

Fuente: Andrés Scheel

### 1. Equipamiento

Tabla 57: Aumento del costo por equipamiento con base al costo más pequeño, esquema 1

Aumento del costo por equipamiento con base al costo más pequeño, esquema 1				
	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
Aumento del costo	\$19,386.75	\$0.00	\$40,837.98	\$98,881.90

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 58: Relación del aumento del costo de equipamiento respecto al aumento del ingreso, esquema 1

Relación del aumento del costo de equipamiento respecto al aumento del ingreso, esquema 1				
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%	
1.68	-	2.27	3.22	
1.52	-	2.07	2.96	
1.38	-	1.90	2.74	
1.27	-	1.75	2.55	

Fuente: Andrés Scheel

En este análisis se puede ver que no es justificado el aumento del costo con relación al aumento del ingreso ya que las mejores relaciones de costo/ingreso son con los caudales más pequeños, sin embargo esto no es motivo suficiente para descartar los demás caudales de diseño mayores ya que el equipamiento representa del 7.87% al 13.78% del costo total según el caudal.



## 2. Canal

Tabla 59: Aumento del costo del canal con base al costo más pequeño, esquema 1

Aumento del costo del canal con base al costo más pequeño, esquema 1			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
\$16,101.72	\$0.00	\$29,055.73	\$51,452.86

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 60: Relación del aumento del costo del canal respecto al aumento del ingreso, esquema 1

Relación del aumento del costo del canal respecto al aumento del ingreso, esquema 1			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
1.39	-	1.62	1.68
1.26	-	1.47	1.54
1.15	-	1.35	1.43
1.05	-	1.25	1.33

Fuente: Andrés Scheel

La relación del costo/ingreso aumenta una cantidad mínima por lo que es justificado diseñar los canales para el caudal de diseño mayor.

## 3. Tubería forzada

Tabla 61: Aumento del costo de la tubería forzada respecto al costo más pequeño esquema 1

Aumento del costo de la tubería forzada respecto al costo más pequeño esquema 1			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
\$0.00	\$424.97	\$21,947.03	\$20,401.84

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 62: Relación del aumento del costo de la tubería forzada respecto al aumento del ingreso, esquema 1

Relación del aumento del costo de la tubería forzada respecto al aumento del ingreso, esquema 1			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
-	-	0.82	1.50
-	-	0.90	1.63
-	-	0.98	1.77
-	-	1.06	1.90

El caudal de diseño que se justifica es el caudal medio. Nuevamente no es una razón justificable para descartar los demás caudales ya que el costo de las tuberías forzadas representa del 6.10% al 7.50% del costo del proyecto.

#### 4. Costos totales

Tabla 63: Relación del aumento del costo respecto al aumento del ingreso, esquema 1

Relación del aumento del costo respecto al aumento del ingreso, esquema 1			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
3.07	-	5.12	5.57
2.77	-	4.65	5.12
2.53	-	4.27	4.74
2.33	-	3.94	4.41

Fuente: Andrés Scheel

Analizando la tabla en general no se justifica el aumento de los costos por el aumento del ingreso esperado, sin embargo no todas las estructuras cambian de magnitud con el cambio del caudal, y siendo éstas últimas las que representan un porcentaje mayor del costo que las estructuras que cambian de magnitud, no se puede descartar los caudales de diseño mayor mediante este análisis.

#### O. Análisis financiero con 100% del capital financiado con bancos

Para este análisis se tomo conservadoramente el valor del precio de venta de la energía de 9 centavos de dólar por cada Kwh generado ya que el precio promedio del 2008 al 2010 ha estado oscilando en torno a ésta cantidad como se ve en la gráfica 3 en los antecedentes. De igual manera la tasa de interés de los bancos se tomó como un 9% que es un porcentaje alto pero cubre cualquier gasto adicional de abogados etc, que se requiera por parte de los bancos. En las Tablas 13 y 14 en los antecedentes se puede observar que la tasa de interés anual para proyectos similares en magnitud es de 7.25% y 8.50% anual. La tasa de descuento se toma como 15% y es la tasa mínima atractiva de retorno para los inversionistas, es la que se utilizaría para obtener el valor

presente del proyecto, en casos donde se pueda aplicar tal concepto de una manera adecuada. La vida útil de una obra de estas características puede ser prolongada indefinidamente con el mantenimiento adecuado, es decir puede durar mucho más de los 25 años que se tomaron para el análisis, pero ésta vida útil de 25 años es para darle un carácter más conservador aún a la obra. Se toma en cuenta un año de construcción.

Tabla 64: Análisis financiero con el caudal medio, esquema 1, 100% financiado con deuda.

Esquema 1 (Caudal = Qmedio)					
Tasa de interés bancos	9%	Costos de operación y mantenimiento (\$/kwh)			
Vida útil en años	25	0.015			
Ingreso anual con \$0.09/kwh	\$84,575.01	Tasa de descuento			
Deuda a financiar	\$1,092,211.19	15%			
<b>TIR</b>					
	Ingresos	Deuda	Intereses	Operación y mantenimiento	Saldo abonado a la deuda
n = 0	\$0.00	-\$1,092,211.19	-\$98,299.01	\$0.00	\$0.00
1	\$84,575.01	-\$1,190,510.19	-\$107,145.92	-\$11,418.82	-\$33,989.72
2	\$84,575.01	-\$1,224,499.92	-\$110,204.99	-\$11,418.82	-\$37,048.80
3	\$84,575.01	-\$1,261,548.72	-\$113,539.38	-\$11,418.82	-\$40,383.19
24	\$84,575.01	-\$3,553,881.58	-\$319,849.34	-\$11,418.82	-\$246,693.15
25	\$84,575.01	-\$3,800,574.73	-\$342,051.73	-\$11,418.82	-\$4,069,470.27

Fuente: Andrés Scheel

Para el caudal medio se puede ver que la deuda con el banco se incrementa con el tiempo, es decir, que los ingresos no alcanzan para pagar ni siquiera los intereses. Hacer un análisis de TIR o valor presente no tiene sentido para este esquema. Este diseño no es económicamente viable.



Tabla 65: Análisis financiero con el 80% del caudal medio, esquema 1, 100% financiado con deuda

Esquema 1 (Caudal = (0.8)Qmedio)					
Tasa de interés bancos	9%	Costos de operación y mantenimiento (\$/kwh)			
Vida útil en años	25	0.015			
Ingreso anual con \$0.09/kwh	\$70,547.95	Tasa de descuento			
Deuda a financiar	\$1,036,141.23	15%			
<b>TIR</b>					
	Ingresos	Deuda	Intereses	Operación y mantenimiento	Saldo abonado a la deuda
n = 0	\$0.00	-\$1,036,141.23	-\$93,252.71	\$0.00	\$0.00
1	\$70,547.95	-\$1,129,393.94	-\$101,645.45	-\$9,565.06	-\$40,662.57
2	\$70,547.95	-\$1,170,056.51	-\$105,305.09	-\$9,565.06	-\$44,322.20
3	\$70,547.95	-\$1,214,378.71	-\$109,294.08	-\$9,565.06	-\$48,311.19
24	\$70,547.95	-\$3,956,740.99	-\$356,106.69	-\$9,565.06	-\$295,123.80
25	\$70,547.95	-\$4,251,864.79	-\$382,667.83	-\$9,565.06	-\$4,573,549.73

Fuente: Andrés Scheel

De igual manera para el 80% del caudal medio se puede ver que la deuda con el banco se incrementa con el tiempo, es decir, que los ingresos no alcanzan para pagar ni siquiera los intereses. Hacer un análisis de TIR o valor presente no tiene sentido para este esquema. Este diseño no es económicamente viable.

Tabla 66: Análisis financiero con el 120% del caudal medio, esquema 1, 100% financiado con deuda

Esquema 1 (Caudal = (1.2)Qmedio)					
Tasa de interés bancos	9%	Costos de operación y mantenimiento (\$/kwh)			
Vida útil en años	25	0.015			
Ingreso anual con \$0.09/kwh	\$92,069.40	Tasa de descuento			
Deuda a financiar	\$1,180,935.42	15%			
<b>TIR</b>					
	Ingresos	Deuda	Intereses	Operación y mantenimiento	Saldo abonado a la deuda
n = 0	\$0.00	-\$1,180,935.42	-\$106,284.19	\$0.00	\$0.00
1	\$92,069.40	-\$1,287,219.61	-\$115,849.77	-\$12,241.45	-\$36,021.81
2	\$92,069.40	-\$1,323,241.43	-\$119,091.73	-\$12,241.45	-\$39,263.78
3	\$92,069.40	-\$1,362,505.20	-\$122,625.47	-\$12,241.45	-\$42,797.52
24	\$92,069.40	-\$3,791,886.09	-\$341,269.75	-\$12,241.45	-\$261,441.80
25	\$92,069.40	-\$4,053,327.89	-\$364,799.51	-\$12,241.45	-\$4,338,299.45

Fuente: Andrés Scheel



Nuevamente para el 120% del caudal medio se puede ver que la deuda con el banco se incrementa con el tiempo, es decir, que los ingresos no alcanzan para pagar ni siquiera los intereses. Hacer un análisis de TIR o valor presente no tiene sentido para este esquema. Este diseño no es económicamente viable.

Tabla 67: Análisis financiero con 6 veces el caudal garantizado el 95% del tiempo, esquema 1, 100% financiado con deuda

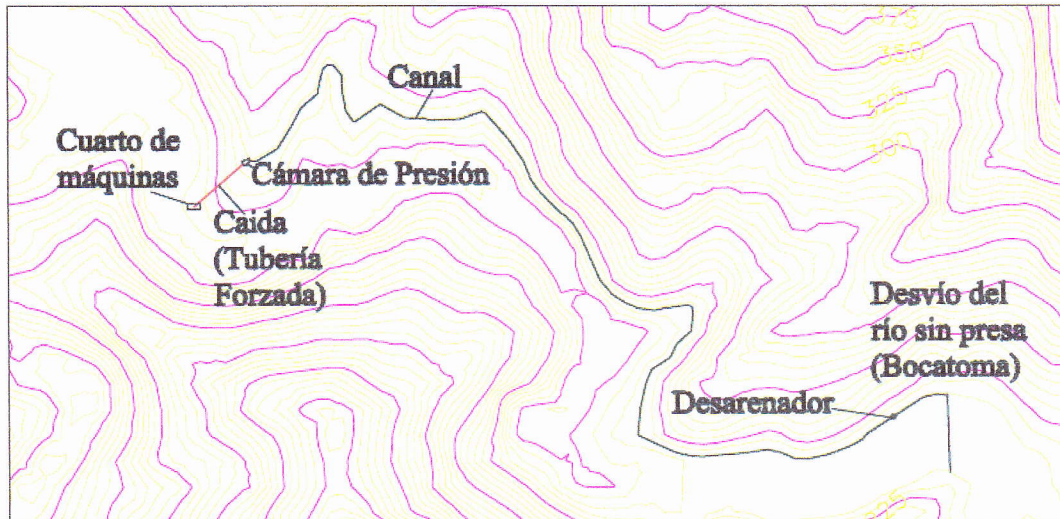
Esquema 1 (Caudal = 6xQ95%)					
Tasa de interés bancos	9%	Costos de operación y mantenimiento (\$/kwh)			
Vida útil en años	25	0.015			
Ingreso anual con \$0.09/kwh	\$106,581.39	Tasa de descuento			
Deuda a financiar	\$1,309,160.84	15%			
<b>TIR</b>					
	<b>Ingresos</b>	<b>Deuda</b>	<b>Intereses</b>	<b>Operación y mantenimiento</b>	<b>Saldo abonado a la deuda</b>
n = 0	\$0.00	-\$1,309,160.84	-\$117,824.48	\$0.00	\$0.00
1	\$106,581.39	-\$1,426,985.32	-\$128,428.68	-\$13,584.69	-\$35,431.98
2	\$106,581.39	-\$1,462,417.29	-\$131,617.56	-\$13,584.69	-\$38,620.86
3	\$106,581.39	-\$1,501,038.15	-\$135,093.43	-\$13,584.69	-\$42,096.73
24	\$106,581.39	-\$3,890,639.43	-\$350,157.55	-\$13,584.69	-\$257,160.85
25	\$106,581.39	-\$4,147,800.27	-\$373,302.02	-\$13,584.69	-\$4,428,105.60

Fuente: Andrés Scheel

Con 6 veces el caudal garantizado el 95% del tiempo se puede ver que la deuda con el banco se incrementa con el tiempo, es decir, que los ingresos no alcanzan para pagar ni siquiera los intereses. Hacer un análisis de TIR o valor presente no tiene sentido para este esquema. Este diseño tampoco es económicamente viable.

## VII. ESQUEMA 2 (Central hidroeléctrica a filo de agua)

Figura 29: Esquema 2



Fuente: Andrés Scheel

El esquema 2 tiene casi toda la obra civil dentro de la finca “El Paraíso de Secanquim” existe un pedazo del canal y la bocatoma que están dentro de la finca “Codema”. El esquema consta de una estructura sencilla o bocatoma para desviar el río por lo que no hay área de inundación, un canal que conduce el caudal, un desarenador, una cámara de presión, tubería de acero para la caída y el cuarto de máquinas.

### A. Movimiento de tierras y accesos a la obra

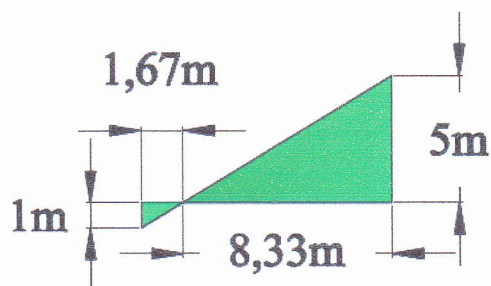
Para entrar a la obra se necesita ampliar un camino ya existente a través de la finca, adicionalmente se necesita hacer un camino de 10.00 metros de ancho tanto para ubicar el canal como para paso de camiones que transportarán los materiales.

Figura 30: Vista en planta y área transversal típica excavación esquema 2



Fuente: Andrés Scheel

Figura 31: Sección típica de excavación y relleno esquema 2



Fuente: Andrés Scheel

## 1. Costos

Tabla 68: Movimientos de tierra esquema 2

Movimientos de tierra esquema 2						
Excavación área transversal típica	Relleno área transversal típica	longitud (m)	Total movimiento (m3)	Costo por m3	Entrada de acceso (\$)	Total (\$)
20.83	0.83	1321.75	28637.04	\$10.00	\$12,500.00	\$298,870.36

Fuente: Andrés Scheel



## B. Caudales de diseño

Para el esquema 2 al igual que el esquema 1, se toman caudales de diseño con base al río Sayté. Dado a que la variación de la cuenca por tomar el río aguas arriba es mínimo, la variación de caudales respecto al esquema 1 se desprecia. Los criterios de diseño son los siguientes:

Tabla 69: Criterios de diseño de caudales esquema 2

<b>Qmed</b>
<b>Q:=0.8*Qmed</b>
<b>Q:=1.2*Qmed</b>
<b>Q=6*Q95%</b>

Fuente: Andrés Scheel

Se toma el caudal medio con una variación positiva y también negativa de un 20% ya que son parámetros que se usan internacionalmente para definir el caudal de diseño.

El criterio de 6 veces el caudal garantizado para el 95% del tiempo no se puede usar en éste esquema porque no existe un embalse regulador ya que no existe una presa formal.

Los caudales de diseño son los siguientes:

Tabla 70: Resultado de los criterios de caudales de diseño esquema 2

<b>Caudal Sayté (m3/s)</b>	
<b>Qmed</b>	1.42
<b>Q:=0.8*Qmed</b>	1.13
<b>Q:=1.2*Qmed</b>	1.70
<b>Q=6*Q95%</b>	-

Fuente: Andrés Scheel

## C. Estructura para desviar el río Sayté (bocatoma)

La estructura tiene una longitud de 90.59 metros y una altura de 1 metro. El área de la estructura es rectangular por lo que la dimensión es de 90.59 metros cuadrados.

**1. Costos.** El costo de la estructura para desviar el río no es muy elevado ya que es una especie de rebalse simple con una compuerta para limpieza. El costo es de \$10,000.00.

#### D. Canales

El canal sí varía significativamente según el caudal de diseño por lo tanto se dimensionaron canales rectangulares, trapezoidales y circulares para cada caudal de diseño de éste esquema, por motivos de simpleza de construcción se escogió el canal rectangular como el indicado para el proyecto sin embargo se presenta los resultados de los demás canales. Para el diseño se tomó una rugosidad del hormigón de 0.017 y una pendiente de 0.3% a lo largo de todo el canal. En el esquema 2 el canal tiene una longitud de 1321.75 metros, con la pendiente de 0.3% y tomando esto en cuenta que el canal inicia 0.50 metros por debajo de la estructura que desvía el río se tiene que hay una pérdida de altura de 3.97 metros por la longitud del canal respecto a la corona de la estructura que desvía el río.

Dimensiones de los canales según su geometría.

Tabla 71: Canal rectangular esquema 2

Canal rectangular		caudal real
Ancho	tirante + 30cm	
1.3	1	1.422
1.3	0.9	1.15
1.3	1.1	1.69
-	-	-

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 72: Capacidad de paso de los canales rectangulares

Para ancho (b) de 1.3m	
tirante	Caudal
0.15	0.15
0.3	0.44
0.45	0.78
0.6	1.16
0.75	1.55
0.9	1.97
1.05	2.39
1.2	2.83
1.35	3.26
1.5	3.7

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 73: Canal trapezoidal

Canal trapezoidal		caudal real
Ancho abajo	tirante + 30cm	
0.8	0.923	1.41
0.8	0.85	1.12
0.8	0.985	1.7

Fuente: Andrés Scheel

La pendiente del trapecio es de 1:1

Tabla 74: Capacidad de paso del canal trapezoidal

Para ancho (b) abajo 0.8m	
tirante	Caudal
0.1	0.055
0.2	0.179
0.3	0.36
0.4	0.61
0.5	0.93
0.6	1.31
0.7	1.77
0.8	2.31
0.9	2.93
1	3.63

Fuente: Andrés Scheel



Tabla 75: Canales circulares

Canal circular		caudal real
diámetro	Tirante	
1.2	0.88	1.43
1.1	0.8	1.123
1.3	0.93	1.712

Fuente: Andrés Scheel

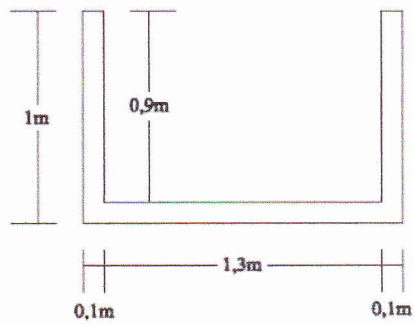
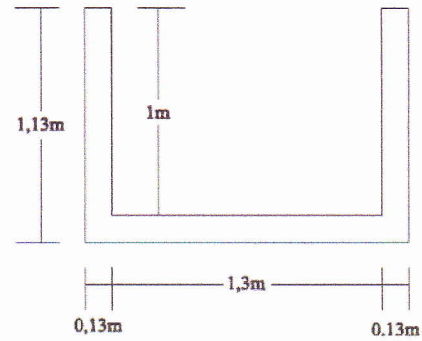
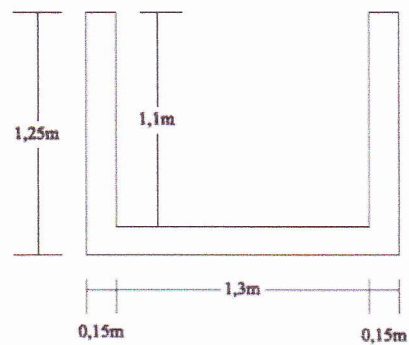
Tabla 76: Capacidad de paso para los canales circulares

Para diámetro 1.1		Para diámetro 1.2		Para diámetro 1.3	
tirante	Caudal	tirante	Caudal	tirante	Caudal
0.11	0.0324	0.12	0.041	0.13	0.0505
0.22	0.1172	0.24	0.1478	0.26	0.1829
0.33	0.252	0.36	0.3179	0.39	0.3936
0.44	0.44	0.48	0.5552	0.52	0.6873
0.55	0.6474	0.6	0.8165	0.65	1.01
0.66	0.8587	0.72	1.083	0.78	1.34
0.77	1.063	0.84	1.3408	0.91	1.6598
0.88	1.283	0.96	1.6174	1.04	2.002
0.99	1.39	1.08	1.7533	1.17	2.17
1.023	1.4011	1.116	1.767	1.209	2.1875
1.1	1.295	1.2	1.633	1.3	2.02

Fuente: Andrés Scheel

Dimensiones de los canales rectangulares para los diferentes caudales de diseño tomando el ancho de los muros de 10cm o 0.13(h) según el mayor.

Figura 32: Área transversal de canales rectangulares según caudal de diseño esquema 2

 $Q=(0.8)Q_{\text{medio}}$  $Q_{\text{medio}}$  $Q=(1.2)Q_{\text{medio}}$ 

Fuente: Andrés Scheel

## 1. Costos

Tabla 77: Costo de los canales según su caudal de diseño esquema 2

Esquema 2							
Caudal de diseño	Longitud del canal (m)	Área (m <sup>2</sup> ) transversal	Volumen (m <sup>3</sup> ) Concreto	Costo (\$) Concreto de 250 kg/cm <sup>2</sup>	Total qq de acero	Costo total de acero (\$)	Costo total del canal (\$)
Q <sub>med</sub>	1321.75	0.463	611.97	\$107,094.79	673.17	\$25,761.27	\$132,856.06
Q:=0.8*Q <sub>med</sub>	1321.75	0.330	436.18	\$76,331.06	479.80	\$18,361.16	\$94,692.23
Q:=1.2*Q <sub>med</sub>	1321.75	0.570	753.40	\$131,844.56	828.74	\$31,714.74	\$163,559.30
Q=6*Q <sub>95%</sub>	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Andrés Scheel

### E. Desarenador

El desarenador al igual que en el esquema 1 se colocó relativamente al inicio del canal para que no se fuera a saturar de sedimentos y sacarlos antes del sistema. Se colocó en un área topográficamente ventajoso para propiciar la limpieza y sobre una parte del terreno donde la estructura no corre peligro por deslaves. Se estima que un 5% del caudal son sólidos por estar en un área montañosa.

El desarenador va a ser de tipo intermitente, es decir que hay que limpiarlo cada cierto tiempo dependiendo de la cantidad de sedimentos que tenga el río. La estructura es una cámara de sedimentación rectangular con el nivel del suelo más bajo que el del canal y con forma de embudo. En el fondo tiene una compuerta para el lavado de los sedimentos, tiene una compuerta que regula la entrada de agua y evitar turbulencia y la salida es un vertedero en alto que evita que suban los sedimentos. La velocidad del agua disminuye en esta sección notablemente.

**1. Costos.** El costo no varía significativamente con el cambio de los caudales de diseño del esquema 1 por lo que se tiene un valor de \$30,000.00.

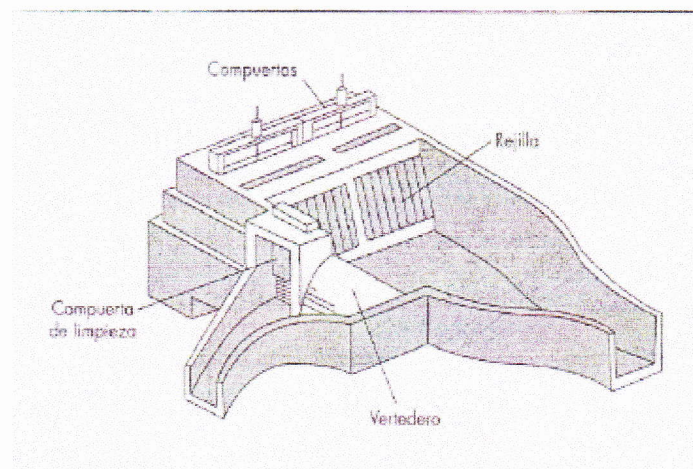
## F. Cámara de presión

Prácticamente es un tanque al final del canal en donde al igual que el desarenador se disminuye la velocidad del agua notablemente y la función principal es evitar que entre aire a la tubería forzada al igual que controlar el ingreso de caudal. Es decir regular el aumento o disminución abrupta de la necesidad de caudal de los generadores evitando el golpe de ariete. El tanque de presión está conectado al canal por medio de una transición de la cual el agua pasa a la tubería de presión a través de una rejilla que evita la entrada de elementos sólidos flotantes.

Los excesos de agua en la cámara de presión se liberan a través de un vertedero y tiene que tener una reserva adecuada de agua para el aumento de velocidad de las turbinas.

Para su diseño se tiene que tener claro que el nivel de agua nunca puede bajar al nivel de la entrada de agua a la tubería forzada.

Figura 33: Esquema básico de la cámara de presión para el esquema 2



Fuente: Kaveshnikov

**1. Costos.** El costo de la cámara de presión no varía significativamente con los caudales de diseño del esquema 1 por lo que su costo es de \$50,000.00.



## G. Tubería forzada

Para el diseño de la tubería forzada se tomo como criterio una velocidad del agua de 2m/s a 3m/s aproximadamente que es según la experiencia es la velocidad óptima para tener una relación adecuada de diámetro respecto a costos. La tubería tiene apoyos a lo largo que permiten el desplazamiento por elongaciones producidas por variaciones de temperatura y vibraciones.

Tabla 78: Coeficiente para cálculo de pérdidas por fricción tubería de acero

Coeficiente para cálculo de pérdidas por fricción tubería de acero						
Diámetro	0.8	1	1.2	1.5	1.8	2
Coefficiente	0.00110000	0.00091709	0.000734198	0.00055982	0.00044895	0.00039532

Fuente: Kaveshnikov

Tabla 79: Diámetro, velocidad y perdidas tubería forzada esquema 2 según caudal de diseño

Sayté tubería forzada Esquema 2				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
	1.42	1.13	1.70	-
diámetro (m)	0.85	0.85	1.00	-
velocidad (m/s)	2.50	2.00	2.15	-
Longitud (m)	80.99	80.99	80.99	-
pérdidas (m)	0.56	0.36	0.34	-

Fuente: Andrés Scheel

**1. Costos.** El costo de la tubería forzada depende entre otras cosas de su grosor que a su vez depende de la presión y el peso que soporta. El espesor es función de la altura, pérdidas y el diámetro.

Tabla 80: Espesor, peso y costo de la tubería forzada según caudal de diseño esquema 2

Sayté tubería forzada Esquema 2				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
	1.42	1.13	1.70	-
diámetro (m)	0.85	0.85	1.00	-
velocidad (m/s)	2.50	2.00	2.15	-
Longitud (m)	80.99	80.99	80.99	-
pérdidas (m)	0.56	0.36	0.34	-
Altura (m)	17.97	18.17	18.19	-
Espesor tubería (m)	0.0172	0.0173	0.0197	-
Peso de la tubería (Kg)	29100.84	29349.73	39523.12	-
<b>Costo (\$7/kg)</b>	<b>\$203,705.90</b>	<b>\$205,448.13</b>	<b>\$276,661.86</b>	-

Fuente: Andrés Scheel

## H. Casa de máquinas

La casa de máquinas alberga la turbina y el generador entre otras cosas. Es un edificio sencillo de block de 10x10 metros, techo de lámina y piso de concreto.

Figura 34: Ejemplo similar de la casa de máquinas esquema 2



Fuente: ESHA (European Small Hydropower Association)

**1. Costos.** El costo de la casa de máquinas no varía significativamente de tamaño con la variación de caudales de diseño al igual que el esquema 1 su costo es de \$10,000.00.

## I. Costo de equipamiento

El equipamiento de la casa de máquinas para este esquema también sería una turbina Kaplan acoplada a un generador asíncrono por la poca caída y gran caudal, si varía según los caudales de diseño ya que depende directamente de la potencia..

Tabla 81: Costo por Equipamiento Sayté Esquema 2

Costo por Equipamiento Sayté Esquema 2				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
	1.42	1.13	1.70	-
Potencia (Kw)	212.20	171.65	257.67	-
Costo (850US/Kw)	\$180,371.55	\$145,906.55	\$219,016.61	-

Fuente: Andrés Scheel

## J. Subestación e interconexión

La subestación básicamente es para elevar el voltaje y así poder interconectarse a la red nacional. El precio promedio es de \$80,000.00 por Mw de conversión. Adicionalmente se tiene que llegar al lugar más cercano para poder interconectarse, para este proyecto el lugar para interconectarse es un pueblo que esta a 5km. El costo por Km es de aproximadamente \$25,000.00 para un voltaje de 13.8 KV.

**1. Costos.** El costo de la interconexión es igual para todos los esquemas y sus respectivos caudales de diseño sin embargo el costo de transformación varia según el esquema y el caudal de diseño. Este costo se da a continuación en el resumen de costos totales.

Interconexión (5km)	\$125,000.00
---------------------	--------------



### K. Resumen de costos totales por caudal de diseño

Cada caudal de diseño tiene costos diferentes en estructuras que son impactadas en gran medida por las variaciones de este caudal de diseño por lo tanto los costos varían acordeamente. Las estructuras que cambian significativamente de costo según el caudal de diseño son los canales, la tubería forzada, el equipamiento del cuarto de máquinas y el equipo para la transformación del voltaje. En los costos se incluye el recurso humano como un porcentaje del costo de la obra física.

Tabla 82: Resumen de costos con caudal medio esquema 2

Costos totales esquema 2 con Q medio		Porcentaje del costo
Ingresos y movimientos de tierra	\$298,870.36	18.59%
Bocatoma	\$10,000.00	0.62%
Canal	\$132,856.06	8.26%
Desarenador	\$30,000.00	1.87%
Cámara de presión	\$50,000.00	3.11%
Tubería forzada	\$203,705.90	12.67%
Cuarto de máquinas	\$10,000.00	0.62%
Equipamiento	\$180,371.55	11.22%
Transformación de Voltaje (\$80,000/Mw)	\$16,976.15	1.06%
Interconexión (5km)	\$125,000.00	7.77%
Ingeniería y administración (12%)	\$126,933.60	7.89%
Mano de obra (40%)	\$423,112.01	26.32%
<b>TOTAL</b>	<b>\$1,607,825.63</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Andrés Scheel



Tabla 83: Resumen de costos con el 80% del caudal medio esquema 2

Costos totales esquema 2 con (0.8)Q medio		Porcentaje del costo
Ingresos y movimientos de tierra	\$298,870.36	19.99%
Bocatoma	\$10,000.00	0.67%
Canal	\$94,692.23	6.33%
Desarenador	\$30,000.00	2.01%
Cámara de presión	\$50,000.00	3.34%
Tubería forzada	\$205,448.13	13.74%
Cuarto de máquinas	\$10,000.00	0.67%
Equipamiento	\$145,906.55	9.76%
Transformación de Voltaje (\$80,000/Mw)	\$13,732.38	0.92%
Interconexión (5km)	\$125,000.00	8.36%
Ingeniería y administración (12%)	\$118,037.96	7.89%
Mano de obra (40%)	\$393,459.86	26.32%
<b>TOTAL</b>	<b>\$1,495,147.45</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 84: Resumen de costos con el 120% del caudal medio esquema 2

Costos totales esquema 2 con (1.2)Q medio		Porcentaje del costo
Ingresos y movimientos de tierra	\$298,870.36	16.33%
Bocatoma	\$10,000.00	0.55%
Canal	\$163,559.30	8.94%
Desarenador	\$30,000.00	1.64%
Cámara de presión	\$50,000.00	2.73%
Tubería forzada	\$276,661.86	15.12%
Cuarto de máquinas	\$10,000.00	0.55%
Equipamiento	\$219,016.61	11.97%
Transformación de Voltaje (\$80,000/Mw)	\$20,613.33	1.13%
Interconexión (5km)	\$125,000.00	6.83%
Ingeniería y administración (12%)	\$144,446.57	7.89%
Mano de obra (40%)	\$481,488.58	26.32%
<b>TOTAL</b>	<b>\$1,829,656.61</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Andrés Scheel

## L. Esquema hidroenergético

**1. Caída.** La altura se obtiene tomando la altura total desde la corona de la estructura de desviación hasta la altura de la turbina. A esta altura se le restan 0.50 metros que es la altura por debajo de la corona que empieza el canal, se le resta la altura que se pierde por la pendiente de 0.3% a lo largo de todo el canal y por último se resta la altura que se pierde por la fricción en la tubería forzada.

**2. Potencia.** La potencia se obtiene multiplicando la altura final, la gravedad ( $9.81\text{m/s}^2$ ), el caudal y la eficiencia de la turbina y generador (se tomó por criterio una eficiencia conjunta de 85%).

Tabla 85: Potencia según el caudal de diseño esquema 2

Sayte Esquema 2				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
	1.42	1.13	1.70	-
Altura (m)	17.97	18.17	18.19	-
Potencia (Kw)	212.20	171.65	257.67	-

Fuente: Andrés Scheel

**3. Energía.** Para la medición de la energía se tomó la producción de energía en intervalos de 20 días con el caudal promedio y la potencia promedio para ese intervalo. Se sumó la energía hasta llegar al caudal de diseño como caudal máximo y se tomó la energía generada por caudales mayores como la energía generada por el caudal de diseño en esos intervalos de tiempo ignorando la generación adicional.

Tabla 86: Producción de energía total anual del río Sayté para el esquema 2

Producción de energía Sayté esquema 2							
Días	Caudal	Diferencia de días	Caudal promedio	Potencia promedio del intervalo (KW)	Energía del intervalo (KWH)	sumatoria de días	sumatoria de energía
365	0.30	20.00	0.32	48.64	23346.52	20.00	23346.52
345	0.35	20.00	0.37	56.01	26885.78	40.00	50232.29
325	0.40	20.00	0.43	64.50	30961.57	60.00	81193.87
305	0.46	20.00	0.49	74.28	35655.25	80.00	116849.11
285	0.53	20.00	0.57	85.54	41060.46	100.00	157909.58
265	0.61	20.00	0.66	98.51	47285.10	120.00	205194.67
245	0.70	20.00	0.76	113.44	54453.36	140.00	259648.04
225	0.81	20.00	0.87	130.64	62708.32	160.00	322356.35
205	0.93	20.00	1.00	150.45	72214.69	180.00	394571.05
185	1.07	20.00	1.15	173.25	83162.21	200.00	477733.26
165	1.23	20.00	1.33	199.52	95769.33	220.00	573502.58
145	1.42	20.00	1.53	229.77	110287.65	240.00	683790.23
125	1.64	20.00	1.76	264.60	127006.89	260.00	810797.12
105	1.89	20.00	2.03	304.71	146260.73	280.00	957057.85
85	2.17	20.00	2.34	350.90	168433.38	300.00	1125491.22
65	2.50	20.00	2.69	404.10	193967.33	320.00	1319458.55
45	2.88	20.00	3.10	465.36	223372.14	340.00	1542830.69
25	3.32	20.00	3.57	535.91	257234.63	360.00	1800065.33
5	3.82	5.00	3.89	583.97	70075.97	365.00	1870141.30
0	3.95	0.00	1.98	297.13	0.00	365.00	1870141.30

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 87: Energía total anual producida por cada caudal de diseño esquema 2

Energía según cada caudal del Esquema 2				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
		1.42	1.13	1.70
<b>Energía total en kw año</b>	<b>1,360,940.47</b>	<b>1,140,830.92</b>	<b>1,459,900.85</b>	-

Fuente: Andrés Scheel



4. **Ingresos.** Los Ingresos son por concepto de venta de energía, por venta de potencia y por venta de bonos en concepto de energía limpia. La venta de energía se analizó con 7, 8, 9 y 10 centavos de dólar por Kwh de generación. La potencia se calculó con un precio de 7 dólares por kw de potencia por mes durante 12 meses del caudal garantizado para el 95% del tiempo. Esto es debido a que no se cuenta con una presa por lo que el caudal es variable y no se garantiza una potencia constante durante todo el año. Los bonos son de 8 dólares por Mwh de generación durante un año.

Tabla 88: Ingresos anuales según el caudal de diseño, esquema 2

<b>Ingresos Sayté Esquema 2</b>				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
	1.42	1.13	1.70	-
<b>Energía total kw año</b>	1,360,940.47	1,140,830.92	1,459,900.85	-
7 c/kWh	\$95,265.83	\$79,858.16	\$102,193.06	-
8 c/kWh	\$108,875.24	\$91,266.47	\$116,792.07	-
9 c/kWh	\$122,484.64	\$102,674.78	\$131,391.08	-
10 c/kWh	\$136,094.05	\$114,083.09	\$145,990.08	-
<b>Potencia</b>				
7 \$/kw mes caudal 95%	\$5,413.29	\$5,473.66	\$5,477.58	-
<b>Bonos</b>				
8 \$/Mwh	\$10,887.52	\$9,126.65	\$11,679.21	-
<b>TOTALES</b>				
7 c/kWh	\$111,566.64	\$94,458.47	\$119,349.85	-
8 c/kWh	\$125,176.05	\$105,866.78	\$133,948.85	-
9 c/kWh	\$138,785.45	\$117,275.09	\$148,547.86	-
10 c/kWh	\$152,394.86	\$128,683.40	\$163,146.87	-
<b>Diferencia Porcentual</b>				
	-6.59%	-21.12%	100%	-

Fuente: Andrés Scheel



### M. Análisis del aumento del costo de las estructuras respecto al aumento del ingreso

Tabla 89: Aumento de ingresos con base al ingreso más pequeño, esquema 2

Aumento de ingresos con base al ingreso más pequeño, esquema 2				
	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
7 c/kWh	\$17,108.17	\$0.00	\$24,891.38	-
8 c/kWh	\$19,309.27	\$0.00	\$28,082.07	-
9 c/kWh	\$21,510.36	\$0.00	\$31,272.77	-
10 c/kWh	\$23,711.46	\$0.00	\$34,463.47	-

Fuente: Andrés Scheel

#### 1. Equipamiento

Tabla 90: Aumento del costo por equipamiento con base al costo más pequeño, esquema 2

Aumento del costo por equipamiento con base al costo más pequeño, esquema 2				
	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
Aumento del costo	\$34,465.00	\$0.00	\$73,110.06	-

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 91: Relación del aumento del costo de equipamiento respecto al aumento del ingreso, esquema 2

Relación del aumento del costo de equipamiento respecto al aumento del ingreso, esquema 2			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
<b>2.01</b>	-	2.94	-
<b>1.78</b>	-	2.60	-
<b>1.60</b>	-	2.34	-
<b>1.45</b>	-	2.12	-

Fuente: Andrés Scheel

En este análisis se puede ver que no es justificado el aumento del costo con relación al aumento del ingreso ya que las mejores relaciones de costo/ingreso son con los caudales más pequeños, sin embargo esto no es motivo suficiente para descartar los demás caudales de diseño mayores ya que el equipamiento representa del 9.76% al 11.97% del costo total según el caudal.

## 2. Canal

Tabla 92: Aumento del costo por canal con base al costo más pequeño, esquema 2

Aumento del costo por canal con base al costo más pequeño, esquema 2			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
\$38,163.84	\$0.00	\$68,867.07	-

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 93: Relación del aumento del costo del canal respecto al aumento del ingreso, esquema 2

Relación del aumento del costo del canal respecto al aumento del ingreso, esquema 2			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
2.23	-	2.77	-
1.98	-	2.45	-
1.77	-	2.20	-
1.61	-	2.00	-

Fuente: Andrés Scheel

La relación del costo/ingreso aumenta una cantidad mínima por lo que es justificado diseñar los canales para el caudal de diseño mayor.

## 3. Tubería forzada

Tabla 94: Aumento del costo de la tubería forzada respecto al costo más pequeño esquema 2

Aumento del costo de la tubería forzada respecto al costo más pequeño esquema 2			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
\$0.00	\$1,742.22	\$72,955.96	-

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 95: Relación del aumento del costo de la tubería forzada respecto al aumento del ingreso, esquema 2

Relación del aumento del costo de la tubería forzada respecto al aumento del ingreso, esquema 2			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
-	-	0.34	-
-	-	0.38	-
-	-	0.43	-
-	-	0.47	-

Fuente: Andrés Scheel

El caudal de diseño que se justifica es el caudal medio. Nuevamente no es una razón justificable para descartar los demás caudales ya que el costo de las tuberías forzadas representa del 12.67% al 15.12% del costo del proyecto. Sin embargo las relaciones costo/ingreso son bastante buenas por ser bajas.

#### 4. Costos totales

Tabla 96: Relación del aumento del costo respecto al aumento del ingreso, esquema 2

Relación del aumento del costo respecto al aumento del ingreso, esquema 2			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
4.25	-	8.63	-
3.76	-	7.65	-
3.38	-	6.87	-
3.06	-	6.24	-

Fuente: Andrés Scheel

Analizando la tabla, en general, no se justifica el aumento de los costos por el aumento del ingreso esperado, sin embargo no todas las estructuras cambian de magnitud con el cambio del caudal, pero en este caso las estructuras analizadas representan un costo significativo de la obra por lo que se puede ir pensando en tomar caudales de diseño pequeños.

#### N. Análisis financiero con 100% del capital financiado con bancos

Para éste análisis se tomo conservadoramente el valor del precio de venta de la energía de 9 centavos de dólar por cada Kwh generado ya que el precio promedio del 2008 al 2010 ha estado oscilando en torno a ésta cantidad como se ve en la gráfica 3 en los antecedentes. De igual manera la tasa de interés de los bancos se tomó como un 9% que es un porcentaje alto pero cubre cualquier gasto adicional de abogados etc, que se requiera por parte de los bancos. En las Tablas 13 y 14 en los antecedentes se puede observar que la tasa de interés anual para proyectos similares en magnitud es de 7.25% y 8.50% anual. La tasa de descuento se toma como 15% y es la Tasa Mínima Atractiva de Retorno para los inversionistas, es la que se utilizaría para obtener el valor



presente del proyecto, en casos donde se pueda aplicar tal concepto de una manera adecuada. La vida útil de una obra de estas características puede ser prolongada indefinidamente con el mantenimiento adecuado, es decir puede durar mucho más de los 25 años que se tomaron para el análisis, pero ésta vida útil de 25 años es para darle un carácter más conservador aún a la obra. Se toma en cuenta un año de construcción.

Tabla 97: Análisis financiero usando el caudal medio, esquema 2, financiando el proyecto con 100% deuda

Esquema 2 (Caudal = Qmedio)					
Tasa de interes bancos	9%	Costos de operación y mantenimiento (\$/kwh)			
Vida útil en años	25	0.015			
Ingreso anual con \$0.09/kwh	\$138,785.45	Tasa de descuento			
Deuda a financiar	\$1,607,825.63	15%			
<b>TIR</b>					
	Ingresos	Deuda	Intereses	Operación y mantenimiento	Saldo abonado a la deuda
n = 0	\$0.00	-\$1,607,825.63	-\$144,704.31	\$0.00	\$0.00
1	\$138,785.45	-\$1,752,529.94	-\$157,727.69	-\$20,414.11	-\$39,356.35
2	\$138,785.45	-\$1,791,886.29	-\$161,269.77	-\$20,414.11	-\$42,898.42
3	\$138,785.45	-\$1,834,784.71	-\$165,130.62	-\$20,414.11	-\$46,759.28
24	\$138,785.45	-\$4,489,053.26	-\$404,014.79	-\$20,414.11	-\$285,643.45
25	\$138,785.45	-\$4,774,696.70	-\$429,722.70	-\$20,414.11	-\$5,086,048.06

Fuente: Andrés Scheel

Para el caudal medio se puede ver que la deuda con el banco se incrementa con el tiempo, es decir, que los ingresos no alcanzan para pagar ni siquiera los intereses. Hacer un análisis de TIR o valor presente no tiene sentido para este esquema. Este diseño no es económicamente viable.

Tabla 98: Análisis financiero usando el 80 % del caudal medio, esquema 2, financiando el proyecto con 100% deuda

Esquema 2 (Caudal = (0.8)Qmedio)					
Tasa de interes bancos	9%	Costos de operación y mantenimiento (\$/kwh)			
Vida útil en años	25	0.015			
Ingreso anual con \$0.09/kwh	\$117,275.09	Tasa de descuento			
Deuda a financiar	\$1,495,147.45	15%			
<b>TIR</b>					
	Ingresos	Deuda	Intereses	Operación y mantenimiento	Saldo abonado a la deuda
n = 0	\$0.00	-\$1,495,147.45	-\$134,563.27	\$0.00	\$0.00
1	\$117,275.09	-\$1,629,710.72	-\$146,673.96	-\$17,112.46	-\$46,511.34
2	\$117,275.09	-\$1,676,222.06	-\$150,859.99	-\$17,112.46	-\$50,697.36
3	\$117,275.09	-\$1,726,919.42	-\$155,422.75	-\$17,112.46	-\$55,260.12
24	\$117,275.09	-\$4,863,734.36	-\$437,736.09	-\$17,112.46	-\$337,573.47
25	\$117,275.09	-\$5,201,307.82	-\$468,117.70	-\$17,112.46	-\$5,569,262.90

Fuente: Andrés Scheel

De igual manera para el 80% del caudal medio se puede ver que la deuda con el banco se incrementa con el tiempo, es decir, que los ingresos no alcanzan para pagar ni siquiera los intereses. Hacer un análisis de TIR o valor presente no tiene sentido para este esquema. Este diseño no es económicamente viable.

Tabla 99: Análisis financiero usando el 120% del caudal medio, esquema 2, financiando el proyecto con 100% deuda

<b>Esquema 2 (Caudal = (1.2)Qmedio)</b>					
Tasa de interes bancos	9%	Costos de operación y mantenimiento (\$/kwh)			
Vida útil en años	25	0.015			
Ingreso anual con \$0.09/kwh	\$148,547.86	Tasa de descuento			
Deuda a financiar	\$1,829,656.61	15%			
<b>TIR</b>					
	Ingresos	Deuda	Intereses	Operación y mantenimiento	Saldo abonado a la deuda
n = 0	\$0.00	-\$1,829,656.61	-\$164,669.10	\$0.00	\$0.00
1	\$148,547.86	-\$1,994,325.71	-\$179,489.31	-\$21,898.51	-\$52,839.96
2	\$148,547.86	-\$2,047,165.67	-\$184,244.91	-\$21,898.51	-\$57,595.56
3	\$148,547.86	-\$2,104,761.23	-\$189,428.51	-\$21,898.51	-\$62,779.16
24	\$148,547.86	-\$5,668,390.81	-\$510,155.17	-\$21,898.51	-\$383,505.82
25	\$148,547.86	-\$6,051,896.64	-\$544,670.70	-\$21,898.51	-\$6,469,917.98

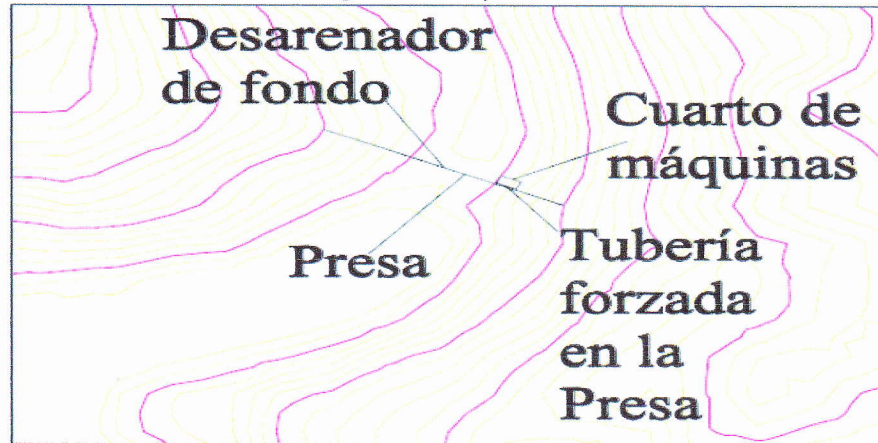
Fuente: Andrés Scheel

Nuevamente para el 120% del caudal medio se puede ver que la deuda con el banco se incrementa con el tiempo, es decir, que los ingresos no alcanzan para pagar ni siquiera los intereses. Hacer un análisis de TIR o valor presente no tiene sentido para este esquema. Este diseño no es económicamente viable.



VII. ESQUEMA 3 (Central hidroeléctrica de embalse con cuarto de máquinas al pie de la presa)

Figura 35: Esquema 3

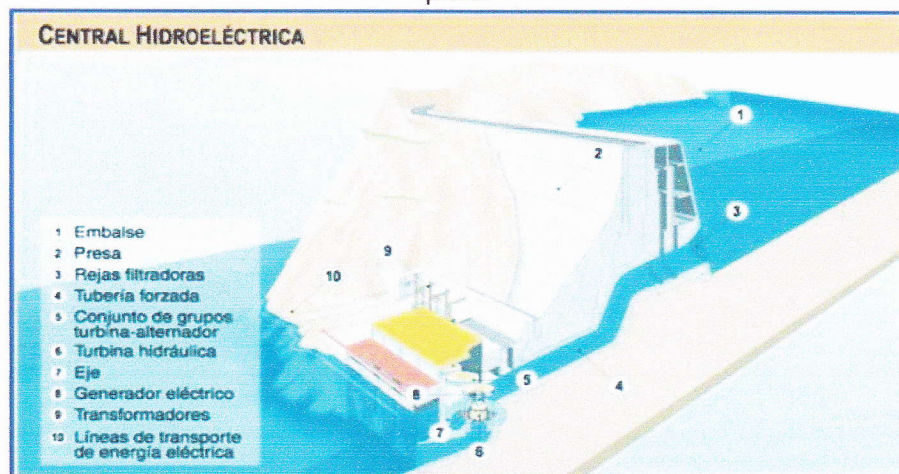


Fuente: Andrés Scheel

El esquema 3 tiene toda la obra civil dentro de la finca “El Paraíso de Secanquim” y consta de una presa que provoca un área de inundación, un desarenador al fondo de la presa, una tubería de acero para la conducción del caudal a través del muro y hacia el cuarto de máquinas y el cuarto de máquinas. Este esquema a diferencia de los dos esquemas anteriores es que no consta de canales y las estructuras que el canal tiene por lo que toda la obra se concentra en el mismo punto de la presa.

Una representación de este esquema se da en la figura siguiente:

Figura 36: Esquema de una central hidroeléctrica con la casa de máquinas al pie de la presa



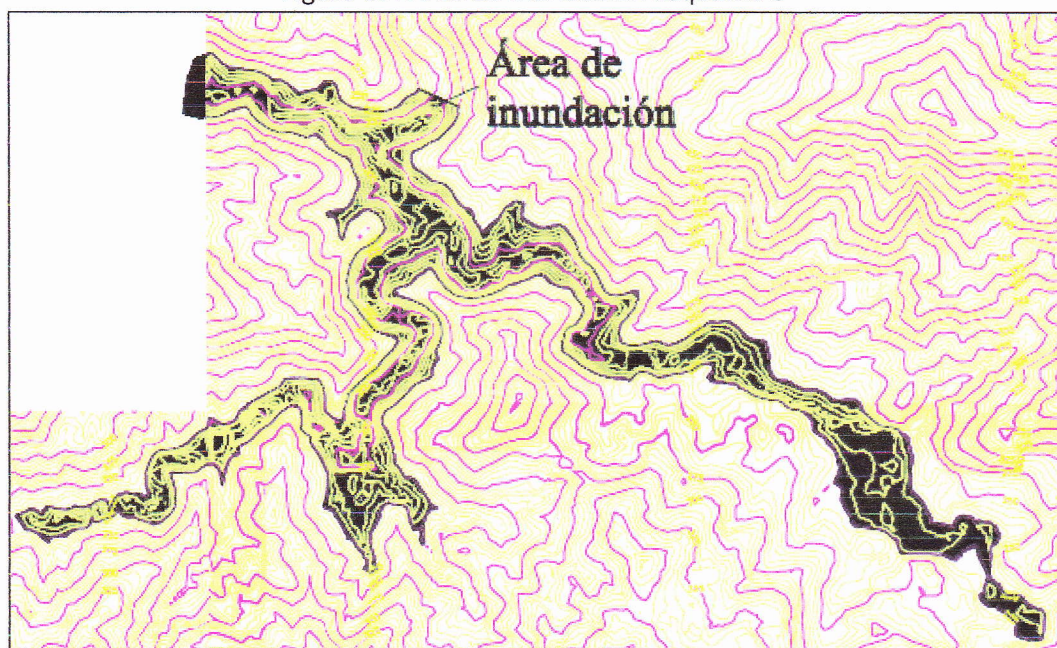
Fuente: INDE

### A. Área de inundación

El área de inundación también queda en mayor parte dentro de la Finca “El Paraíso de Secanquim”. Hay una parte que queda dentro de la finca vecina “Codema” nuevamente y otra parte que queda dentro de la comunidad Sebalamte.

El área de inundación es de 1,027,860.74 metros cuadrados, es decir 1.03 Km cuadrados y una profundidad de 20 metros aproximadamente. Con estas dimensiones se tiene un volumen de embalse de 20,557,214.00 metros cúbicos que es mayor a lo requerido por el criterio de caudal de diseño con regulación (114,480.00 metros cúbicos que es la acumulación durante 20 horas del caudal garantizado 95% del tiempo).

Figura 37: Área de inundación esquema 3



Fuente: Andrés Scheel

### B. Movimiento de tierras y accesos a la obra

Para entrar a la obra se necesita ampliar un camino ya existente a través de la finca. Adicionalmente a esto existe el movimiento de tierra para la construcción de la presa.



## 1. Costos

Tabla 100: Movimientos de tierra esquema 3

Movimientos de tierra esquema 3			
Total movimiento (m3)	Costo por m3	Entrada de acceso (\$)	Total (\$)
100	\$10.00	25000	26000

Fuente: Andrés Scheel

## C. Caudales de diseño

Para el esquema 3 se toman caudales de diseño sumando los caudales del río Sayté, el río Chisay y la quebrada Muquilá. Los criterios son los siguientes:

Tabla 101: Criterio de caudales de diseño para el esquema 3

Qmed
$Q:=0.8*Qmed$
$Q:=1.2*Qmed$
$Q=6*Q95\%$

Fuente: Andrés Scheel

Se toma el caudal medio con una variación positiva y también negativa de un 20% ya que son parámetros que se usan internacionalmente para definir el caudal de diseño, también se toma el criterio de seis veces el caudal garantizado para el 95% del tiempo que es un criterio que se usa en Guatemala, éste último es tomando en cuenta una regulación diaria de 20 horas para liberar 4 horas el caudal de diseño por lo que se requiere de un embalse regulador o presa.

Los caudales de diseño son los siguientes:

Tabla 102: Resultado para los criterios de caudales de diseño para el esquema 3

Caudal Sayté (m3/s)	
Qmed	5.30
$Q:=0.8*Qmed$	4.24
$Q:=1.2*Qmed$	6.36
$Q=6*Q95\%$	9.54

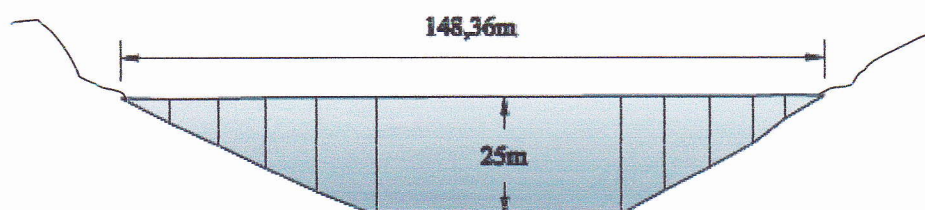
Fuente: Andrés Scheel



## D. Presa

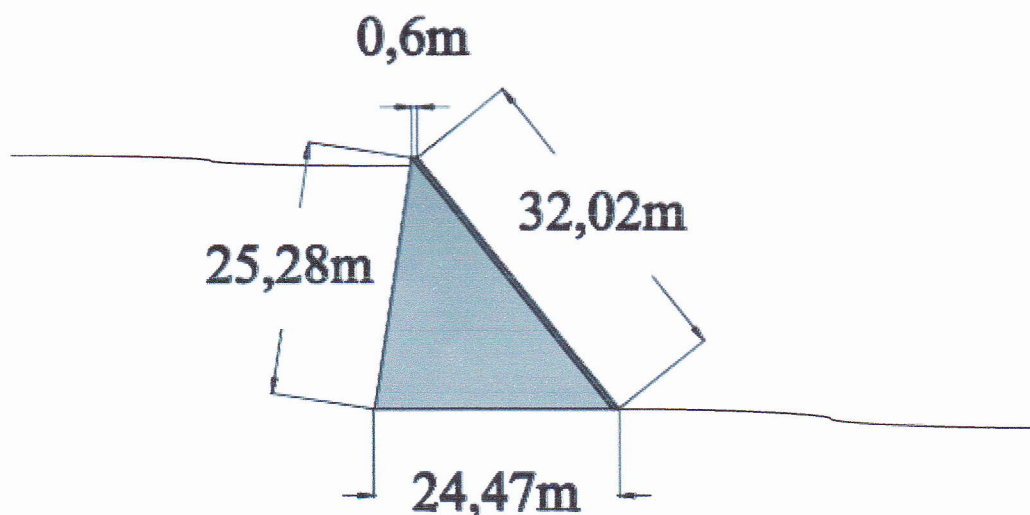
La presa tiene una longitud de 148.36 metros y una altura de 25 metros. El área de la presa es de 2549.17 metros cuadrados.

Figura 38: Perfil de la presa esquema 3



Fuente: Andrés Scheel

Figura 39: Sección transversal de la presa esquema 3



Fuente: Andrés Scheel

De igual manera para fines de cuantificación de costo aproximado, el cuerpo de la presa se divide en dos partes, la losa vertedora que tiene un espesor de 0.60 metros y es de concreto más resistente ( $250 \text{ kg/cm}^2$ ) y el núcleo que es de concreto menos resistente ( $175 \text{ kg/cm}^2$ ). La losa vertedora tiene una doble malla de acero de varillas #4 separadas en ambos sentidos en 0.25 metros, que es principalmente para resistir dilataciones por cambios de temperatura y vibraciones. El núcleo tiene igualmente varillas #4 separadas tridimensionalmente 0.30 metros.

La proporciones de pendiente río arriba son (X/Y) 0.15/1.00 y río abajo son (X/Y) 0.8/1.00.

### 1. Costos

Tabla 103: Costos de la presa del esquema 3

<b>Presa esquema 3</b>						
Área transversal losa vertedora (m2)	Volumen área vertedora (m3)	Costo (\$) Concreto de 250 kg/cm2	Metros lineales de acero	Cantidad de varillas	Costo acero	Costo total losa vertedora(\$)
15.00	2225.40	\$389,445.00	76368.56	12728.09	\$69,584.03	\$459,029.03
Área transversal del núcleo (m2)	Volumen del núcleo (m3)	Costo (\$) Concreto de 175 kg/cm2	Metros lineales de acero	Cantidad de varillas	Costo acero	Costo total del núcleo (\$)
296.88	44045.12	\$6,496,654.73	1016205.44	169367.57	\$925,926.47	\$7,422,581.20
					<b><u>\$7,881,610.23</u></b>	
					<b>Costo total de la presa (\$)</b>	
					<b><u>3</u></b>	

Fuente: Andrés Scheel

### E. Desarenador

El desarenador más que una estructura como en los esquemas anteriores, es simplemente una compuerta en el fondo de la presa con su respectiva tubería que atraviesa la presa. La limpieza se hace en su mayoría mecánicamente.

El desarenador va a ser de tipo intermitente, es decir que hay que limpiar el fondo de la presa cada cierto tiempo dependiendo de la cantidad de sedimentos que tenga el río.

**1. Costos.** El costo no varía con el cambio de los caudales de diseño. Se tiene un valor similar al de los esquemas 1 y 2 de \$30,000.00

## F. Cámara de presión

No se necesita construir esta estructura ya que el mismo embalse cumple ésta función de regular los cambios repentinos del requerimiento del caudal para la generación.

## G. Tubería Forzada

Para el diseño de la tubería forzada se tomo como criterio una velocidad del agua de 2m/s a 3m/s aproximadamente que es según la experiencia la velocidad óptima para tener una relación adecuada de diámetro respecto a costos. La tubería esta instalada dentro de la presa horizontalmente y no verticalmente como en los esquemas anteriores.

Tabla 104: Coeficiente para cálculo de pérdidas por fricción tubería de acero

Coeficiente para cálculo de pérdidas por fricción tubería de acero						
Diámetro	0.8	1	1.2	1.5	1.8	2
Coeficiente	0.00110000	0.00091709	0.000734198	0.00055982	0.00044895	0.00039532

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 105: Diámetros, velocidades y pérdidas en la tubería forzada según el caudal de diseño esquema 3

Tubería forzada Esquema 3				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
	5.30	4.24	6.36	9.54
diámetro (m)	1.50	1.50	2.00	2.00
velocidad (m/s)	3.00	2.40	2.02	3.05
Longitud (m)	24.50	24.50	24.50	24.50
pérdidas (m)	0.12	0.08	0.04	0.09

Fuente: Andrés Scheel

1. **Costos.** El costo de la tubería forzada depende entre otras cosas de su grosor que a su vez depende de la presión y el peso que soporta. El espesor es función de la altura, pérdidas y el diámetro.



Tabla 106: Espesor, peso y costo de la tubería forzada según el caudal de diseño esquema 3

Costo de la tubería forzada Esquema 3				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
		5.30	4.24	6.36
diámetro (m)	1.50	1.50	2.00	2.00
velocidad (m/s)	3.00	2.40	2.02	3.05
Longitud (m)	24.50	24.50	24.50	24.50
pérdidas (m)	0.12	0.08	0.04	0.09
Altura (m)	24.38	24.42	24.46	24.41
Espesor tubería (m)	0.0355	0.0356	0.0463	0.0460
Peso de la tubería (Kg)	32185.18	32237.25	56047.13	55458.26
<b>Costo (\$7/kg)</b>	<b>\$225,296.27</b>	<b>\$225,660.73</b>	<b>\$392,329.93</b>	<b>\$388,207.82</b>

Fuente: Andrés Scheel

## H. Casa de máquinas

La casa de máquinas alberga la turbina y el generador entre otras cosas. Es un edificio sencillo de block de 15x15 metros, techo de lámina y piso de concreto. Ésta estructura es parte de la presa y tiene una dimensión mayor que la de los esquemas anteriores por ser el equipo de generación más grande.

**1. Costos.** El costo de la casa de máquinas no varía significativamente de tamaño con la variación de caudales de diseño por lo que su costo es de \$20,000.00 ya que es aproximadamente el doble de tamaño que en los esquemas anteriores.

## I. Costos de equipamiento

El equipamiento de la casa de maquinas si varía según los caudales de diseño ya que depende directamente de la potencia. La turbina por el gran caudal y poca caída es una turbina Kaplan acoplada a un generador asincrónico.

Tabla 107: Costo por equipamiento Esquema 3

Costo por equipamiento Esquema 3				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
		5.30	4.24	6.36
Potencia (Kw)	1077.30	863.41	1297.22	1941.79
Costo (850US/Kw)	\$915,704.06	\$733,898.71	\$1,102,636.64	\$1,650,521.83

Fuente: Andrés Scheel

## J. Subestación e interconexión

La subestación básicamente es para elevar o bajar el voltaje y así poder interconectarse a la red nacional. El precio promedio es de \$80,000.00 por Mw de conversión. Adicionalmente se tiene que llegar al lugar más cercano para poder interconectarse, para este proyecto el lugar para interconectarse es un pueblo que está a 5km. El costo por Km es de aproximadamente \$25,000.00 para un voltaje de 13.8 KV.

**1. Costos.** El costo de la interconexión es igual para todos los esquemas y sus respectivos caudales de diseño sin embargo el costo de transformación varia según el esquema y el caudal de diseño. Este costo se da a continuación en el resumen de costos totales.

Interconexión (5km)	\$125,000.00
---------------------	--------------

## K. Resumen de costos totales por caudal de diseño

Cada caudal de diseño tiene costos diferentes en estructuras que son impactadas en gran medida por las variaciones de este caudal de diseño por lo tanto los costos varían acordeamente. Las estructuras que cambian significativamente de costo según el caudal de diseño la tubería forzada, el equipamiento del cuarto de máquinas y el equipo para la transformación del voltaje. Adicionalmente en los costos se incluye el recurso humano como un porcentaje del costo de la obra física.

Tabla 108: Costo totales con el caudal medio, Esquema 3

Costos totales esquema 3 con Q medio		Porcentaje del costo
Ingresos y movimientos de tierra	\$26,000.00	0.18%
Presa	\$7,881,610.23	55.70%
Canal	\$0.00	0.00%
Desarenador	\$30,000.00	0.21%
Cámara de presión	\$0.00	0.00%
Tubería forzada	\$225,296.27	1.59%
Cuarto de máquinas	\$20,000.00	0.14%
Equipamiento	\$915,704.06	6.47%
Transformación de Voltaje (\$80,000/Mw)	\$86,183.91	0.61%
Interconexión (5km)	\$125,000.00	0.88%
Ingeniería y administración (12%)	\$1,117,175.34	7.89%
Mano de obra (40%)	\$3,723,917.79	26.32%
<b>TOTAL</b>	<b>\$14,150,887.59</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 109: Costo totales con 80% del caudal medio, Esquema 3

Costos totales esquema 3 con (0.8)Q medio		Porcentaje del costo
Ingresos y movimientos de tierra	\$26,000.00	0.19%
Presa	\$7,881,610.23	56.91%
Canal	\$0.00	0.00%
Desarenador	\$30,000.00	0.22%
Cámara de presión	\$0.00	0.00%
Tubería forzada	\$225,660.73	1.63%
Cuarto de máquinas	\$20,000.00	0.14%
Equipamiento	\$733,898.71	5.30%
Transformación de Voltaje (\$80,000/Mw)	\$69,072.82	0.50%
Interconexión (5km)	\$125,000.00	0.90%
Ingeniería y administración (12%)	\$1,093,349.10	7.89%
Mano de obra (40%)	\$3,644,497.00	26.32%
<b>TOTAL</b>	<b>\$13,849,088.58</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Andrés Scheel



Tabla 110: Costo totales con 120% del caudal medio, Esquema 3

Costos totales esquema 3 con (1.2)Q medio		Porcentaje del costo
Ingresos y movimientos de tierra	\$26,000.00	0.18%
Presa	\$7,881,610.23	53.56%
Canal	\$0.00	0.00%
Desarenador	\$30,000.00	0.20%
Cámara de presión	\$0.00	0.00%
Tubería forzada	\$392,329.93	2.67%
Cuarto de máquinas	\$20,000.00	0.14%
Equipamiento	\$1,102,636.64	7.49%
Transformación de Voltaje (\$80,000/Mw)	\$103,777.57	0.71%
Interconexión (5km)	\$125,000.00	0.85%
Ingeniería y administración (12%)	\$1,161,762.52	7.89%
Mano de obra (40%)	\$3,872,541.74	26.32%
<b>TOTAL</b>	<b>\$14,715,658.62</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 111: Costo totales con 6X el caudal garantizado el 95% del tiempo, Esquema 3

Costos totales esquema 3 con 6xQ95%		Porcentaje del costo
Ingresos y movimientos de tierra	\$26,000.00	0.17%
Presa	\$7,881,610.23	50.46%
Canal	\$0.00	0.00%
Desarenador	\$30,000.00	0.19%
Cámara de presión	\$0.00	0.00%
Tubería forzada	\$388,207.82	2.49%
Cuarto de máquinas	\$20,000.00	0.13%
Equipamiento	\$1,650,521.83	10.57%
Transformación de Voltaje (\$80,000/Mw)	\$155,343.23	0.99%
Interconexión (5km)	\$125,000.00	0.80%
Ingeniería y administración (12%)	\$1,233,201.97	7.89%
Mano de obra (40%)	\$4,110,673.24	26.32%
<b>TOTAL</b>	<b>\$15,620,558.32</b>	<b>100.00%</b>

Fuente: Andrés Scheel

## L. Esquema hidroenergético

1. **Caída.** La altura se obtiene tomando la altura total desde la corona de la presa hasta la altura de la turbina. A esta altura se le restan 0.50 metros que es la altura de la superficie del agua del embalse adicionalmente se le resta la altura que se pierde por la fricción en la tubería forzada.

2. **Potencia.** La potencia se obtiene multiplicando la altura final, la gravedad ( $9.81\text{m/s}^2$ ), el caudal y la eficiencia de la turbina y generador (se tomó por criterio una eficiencia conjunta de 85%).

Tabla 112: Potencia según el caudal de diseño, Esquema 3

Esquema 3				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
	5.30	4.24	6.36	9.54
Altura (m)	24.38	24.42	24.46	24.41
Potencia (Kw)	1077.30	863.41	1297.22	1941.79

Fuente: Andrés Scheel

3. **Energía.** Para la medición de la energía se tomó la producción de energía en intervalos de 20 días con el caudal promedio y la potencia promedio para ese intervalo. Se sumó la energía hasta llegar al caudal de diseño como caudal máximo y se tomó la energía generada por caudales mayores como la energía generada por el caudal de diseño en esos intervalos de tiempo ignorando la generación adicional.

Tabla 113: Producción de energía total anual del río Sayté, Chisay y la quebrada Muquilá para el esquema 3

Producción de energía total para el esquema 3							
Días	Caudal	Diferencia de días	Caudal promedio	Potencia promedio del intervalo (KW)	Energía del intervalo (KWH)	sumatoria de días	sumatoria de energía
365	1.12	20.00	1.21	245.99	118073.92	20.00	118073.92
345	1.29	20.00	1.39	283.28	135973.54	40.00	254047.47
325	1.49	20.00	1.60	326.22	156586.69	60.00	410634.16
305	1.72	20.00	1.85	375.68	180324.72	80.00	590958.88
285	1.98	20.00	2.12	432.63	207661.37	100.00	798620.25
265	2.27	20.00	2.45	498.21	239142.15	120.00	1037762.40
245	2.62	20.00	2.82	573.74	275395.33	140.00	1313157.73
225	3.02	20.00	3.25	660.72	317144.36	160.00	1630302.09
205	3.47	20.00	3.74	760.88	365222.42	180.00	1995524.51
185	4.00	20.00	4.30	876.23	420588.95	200.00	2416113.45
165	4.61	20.00	4.96	1009.06	484348.86	220.00	2900462.32
145	5.31	20.00	5.71	1162.03	557774.57	240.00	3458236.89
125	6.11	20.00	6.57	1338.19	642331.39	260.00	4100568.28
105	7.04	20.00	7.57	1541.06	739706.73	280.00	4840275.01
85	8.10	20.00	8.72	1774.67	851843.87	300.00	5692118.88
65	9.33	20.00	10.04	2043.71	980980.63	320.00	6673099.51
45	10.75	20.00	11.56	2353.53	1129694.10	340.00	7802793.61
25	12.37	20.00	13.31	2710.32	1300952.05	360.00	9103745.67
5	14.25	5.00	14.51	2953.38	354405.94	365.00	9458151.61
0	14.76	0.00	7.38	1502.74	0.00	365.00	9458151.61

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 114: Energía total anual producida por cada caudal de diseño, esquema 3

Energía producida por caudal de diseño del Esquema 3				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
		5.30	4.24	6.36
<b>Energía total en kw año</b>	<b>6,906,422.05</b>	<b>5,761,496.10</b>	<b>7,378,542.35</b>	<b>8,218,979.15</b>

Fuente: Andrés Scheel

4. **Ingresos.** Los Ingresos son por concepto de venta de energía, por venta de potencia (ya que se tiene presa y se puede garantizar la potencia todo el año) y por venta de bonos en concepto de energía limpia. La venta de energía se analizó con 7, 8,



9 y 10 centavos de dólar por Kwh de generación. La potencia se calculó con un precio de 7 dólares por kw de potencia por mes durante 12 meses. Los bonos son de 8 dólares por Mwh de generación durante un año.

Tabla 115: Ingresos anuales según el caudal de diseño, esquema 3

Ingresos Esquema 3				
Caudales	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
	5.30	4.24	6.36	9.54
<b>Energía total kw año</b>	6,906,422.05	5,761,496.10	7,378,542.35	8,218,979.15
7 c/kWh	\$483,449.54	\$403,304.73	\$516,497.96	\$575,328.54
8 c/kWh	\$552,513.76	\$460,919.69	\$590,283.39	\$657,518.33
9 c/kWh	\$621,577.98	\$518,534.65	\$664,068.81	\$739,708.12
10 c/kWh	\$690,642.21	\$576,149.61	\$737,854.23	\$821,897.91
<b>Potencia</b>				
7 \$/kw mes	\$90,493.11	\$72,526.46	\$108,966.44	\$163,110.39
<b>Bonos</b>				
8 \$/Mwh	\$55,251.38	\$46,091.97	\$59,028.34	\$65,751.83
<b>TOTALES</b>				
7 c/kWh	\$629,194.03	\$521,923.16	\$684,492.75	\$804,190.77
8 c/kWh	\$698,258.25	\$579,538.12	\$758,278.17	\$886,380.56
9 c/kWh	\$767,322.47	\$637,153.08	\$832,063.59	\$968,570.35
10 c/kWh	\$836,386.69	\$694,768.04	\$905,849.02	\$1,050,760.14
<b>Diferencia Porcentual</b>				
	-20.40%	-33.88%	-13.79%	100.00%

Fuente: Andrés Scheel

#### M. Análisis del aumento del costo de las estructuras respecto al aumento del ingreso

Tabla 116: Aumento de ingresos con base al ingreso más pequeño, esquema 3

Aumento de ingresos con base al ingreso más pequeño, esquema 3				
	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
7 c/kWh	\$107,270.87	\$0.00	\$162,569.59	\$282,267.61
8 c/kWh	\$118,720.13	\$0.00	\$178,740.05	\$306,842.44
9 c/kWh	\$130,169.39	\$0.00	\$194,910.51	\$331,417.27
10 c/kWh	\$141,618.65	\$0.00	\$211,080.98	\$355,992.10

Fuente: Andrés Scheel

## 1. Equipamiento

Tabla 117: Aumento del costo por equipamiento con base al costo más pequeño, esquema 3

Aumento del costo por equipamiento con base al costo más pequeño, esquema 3				
	Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
Aumento del costo	\$181,805.35	\$0.00	\$368,737.92	\$916,623.11

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 118: Relación del aumento del costo de equipamiento respecto al aumento del ingreso, esquema 3

Relación del aumento del costo de equipamiento respecto al aumento del ingreso, esquema 3			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
1.69	-	2.27	3.25
1.53	-	2.06	2.99
1.40	-	1.89	2.77
1.28	-	1.75	2.57

Fuente: Andrés Scheel

En este análisis se puede ver que no es justificado el aumento del costo del equipamiento con relación al aumento del ingreso ya que las mejores relaciones de costo/ingreso son con los caudales más pequeños, sin embargo esto no es motivo suficiente para descartar los demás caudales de diseño mayores ya que el equipamiento representa del 5.30% al 10.57% del costo total según el caudal.

## 2. Tubería forzada

Tabla 119: Aumento del costo de la tubería forzada respecto al costo más pequeño, esquema 3

Aumento del costo de la tubería forzada respecto al costo más pequeño, esquema 3			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
\$0.00	\$364.46	\$167,033.66	\$162,911.55

Fuente: Andrés Scheel

Tabla 120: Relación del aumento del costo de la tubería forzada respecto al aumento del ingreso, esquema 3

Relación del aumento del costo de la tubería forzada respecto al aumento del ingreso, esquema 3			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
-	-	0.97	1.73
-	-	1.07	1.88
-	-	1.17	2.03
-	-	1.26	2.19

Fuente: Andrés Scheel

El caudal de diseño que se justifica es el caudal medio. Nuevamente no es una razón justificable para descartar los demás caudales ya que el costo de las tuberías forzadas representa del 1.59% al 2.67% del costo del proyecto.

### 3. Costos totales

Tabla 121: Relación del aumento del costo respecto al aumento del ingreso, esquema 3

Relación del aumento del costo respecto al aumento del ingreso, esquema 3			
Qmed	Q:=0.8*Qmed	Q:=1.2*Qmed	Q=6*Q95%
1.69	-	3.30	3.82
1.53	-	3.00	3.52
1.40	-	2.75	3.26
1.28	-	2.54	3.03

Fuente: Andrés Scheel

Analizando la tabla en general no se justifica el aumento de los costos por el aumento del ingreso esperado, sin embargo no todas las estructuras cambian de magnitud con el cambio del caudal, y siendo estas últimas las que representan un porcentaje mayor del costo que las estructuras que cambian de magnitud, no se puede descartar los caudales de diseño mayor mediante éste análisis.



#### N. Análisis financiero con 100% del capital financiado con bancos

Para este análisis se tomó conservadoramente el valor del precio de venta de la energía de 9 centavos de dólar por cada Kwh generado ya que el precio promedio del 2008 al 2010 ha estado oscilando en torno a esta cantidad como se ve en la Gráfica 3 en los antecedentes. De igual manera la tasa de interés de los bancos se tomó como un 9% que es un porcentaje alto pero cubre cualquier gasto adicional de abogados etc, que se requiera por parte de los bancos. En las Tablas 13 y 14 en los antecedentes se puede observar que la tasa de interés anual para proyectos similares en magnitud es de 7.25% y 8.50% anual. La tasa de descuento se toma como 15% y es la tasa mínima atractiva de retorno para los inversionistas, es la que se utilizaría para obtener el valor presente del proyecto, en casos donde se pueda aplicar tal concepto de una manera adecuada. La vida útil de una obra de estas características puede ser prolongada indefinidamente con el mantenimiento adecuado, es decir puede durar mucho más de los 25 años que se tomaron para el análisis, pero esta vida útil de 25 años es para darle un carácter más conservador aún a la obra. Se toma en cuenta un año de construcción.

Tabla 122: Análisis financiero usando el caudal medio, esquema 3, financiando el proyecto con 100% de deuda.

Esquema 3 (Caudal = Qmedio)					
Tasa de interés bancos	9%	Costos de operación y mantenimiento (\$/kwh)			
Vida útil en años	25	0.015			
Ingreso anual con \$0.09/kwh	\$767,322.47	Tasa de descuento			
Deuda a financiar	\$14,150,887.59	15%			
<b>TIR</b>		*****			
	Ingresos	Deuda	Intereses	Operación y mantenimiento	Saldo abonado a la deuda
n = 0	\$0.00	-\$14,150,887.59	-\$1,273,579.88	\$0.00	\$0.00
1	\$767,322.47	-\$15,424,467.48	-\$1,388,202.07	-\$103,596.33	-\$724,475.93
2	\$767,322.47	-\$16,148,943.41	-\$1,453,404.91	-\$103,596.33	-\$789,678.77
3	\$767,322.47	-\$16,938,622.18	-\$1,524,476.00	-\$103,596.33	-\$860,749.86
24	\$767,322.47	-\$65,798,683.68	-\$5,921,881.53	-\$103,596.33	-\$5,258,155.39
25	\$767,322.47	-\$71,056,839.08	-\$6,395,115.52	-\$103,596.33	-\$76,788,228.45

Fuente: Andrés Scheel

Para el caudal medio se puede ver que la deuda con el banco se incrementa con el tiempo, es decir, que los ingresos no alcanzan para pagar ni siquiera los intereses. Hacer un análisis de TIR o valor presente no tiene sentido para este esquema. Este diseño no es económicamente viable.

Tabla 123: Análisis financiero usando el 80% del caudal medio, esquema 3, financiando el proyecto con 100% de deuda.

<b>Esquema 3 (Caudal = (0.8)Qmedio)</b>					
Tasa de interés bancos	9%	Costos de operación y mantenimiento (\$/kwh)			
Vida útil en años	25	0.015			
Ingreso anual con \$0.09/kwh	\$637,153.08	Tasa de descuento			
Deuda a financiar	\$13,849,088.58	15%			
<b>TIR</b>		*****			
	<b>Ingresos</b>	<b>Deuda</b>	<b>Intereses</b>	<b>Operación y mantenimiento</b>	<b>Saldo abonado a la deuda</b>
n = 0	\$0.00	-\$13,849,088.58	-\$1,246,417.97	\$0.00	\$0.00
1	\$637,153.08	-\$15,095,506.56	-\$1,358,595.59	-\$86,422.44	-\$807,864.95
2	\$637,153.08	-\$15,903,371.51	-\$1,431,303.44	-\$86,422.44	-\$880,572.80
3	\$637,153.08	-\$16,783,944.31	-\$1,510,554.99	-\$86,422.44	-\$959,824.35
24	\$637,153.08	-\$71,267,922.81	-\$6,414,113.05	-\$86,422.44	-\$5,863,382.42
25	\$637,153.08	-\$77,131,305.22	-\$6,941,817.47	-\$86,422.44	-\$83,522,392.05

Fuente: Andrés Scheel

De igual manera para el 80% del caudal medio se puede ver que la deuda con el banco se incrementa con el tiempo, es decir, que los ingresos no alcanzan para pagar ni siquiera los intereses. Hacer un análisis de TIR o valor presente no tiene sentido para este esquema. Este diseño no es económicamente viable.



Tabla 124: Análisis financiero usando el 120% del caudal medio, esquema 3, financiando el proyecto con 100% de deuda.

<b>Esquema 3 (Caudal = (1.2)Qmedio)</b>					
Tasa de interés bancos	9%	Costos de operación y mantenimiento (\$/kwh)			
Vida útil en años	25	0.015			
Ingreso anual con \$0.09/kwh	\$832,063.59	Tasa de descuento			
Deuda a financiar	\$14,715,658.62	15%			
<b>TIR</b>					
	Ingresos	Deuda	Intereses	Operación y mantenimiento	Saldo abonado a la deuda
n = 0	\$0.00	-\$14,715,658.62	-\$1,324,409.28	\$0.00	\$0.00
1	\$832,063.59	-\$16,040,067.90	-\$1,443,606.11	-\$110,678.14	-\$722,220.65
2	\$832,063.59	-\$16,762,288.55	-\$1,508,605.97	-\$110,678.14	-\$787,220.51
3	\$832,063.59	-\$17,549,509.06	-\$1,579,455.82	-\$110,678.14	-\$858,070.36
24	\$832,063.59	-\$66,257,469.95	-\$5,963,172.30	-\$110,678.14	-\$5,241,786.84
25	\$832,063.59	-\$71,499,256.78	-\$6,434,933.11	-\$110,678.14	-\$77,212,804.44

Fuente: Andrés Scheel

Nuevamente para el 120% del caudal medio se puede ver que la deuda con el banco se incrementa con el tiempo, es decir, que los ingresos no alcanzan para pagar ni siquiera los intereses. Hacer un análisis de TIR o valor presente no tiene sentido para este esquema. Este diseño no es económicamente viable.

Tabla 125: Análisis financiero usando 6 veces el caudal garantizado el 95% del tiempo, esquema 3, financiando el proyecto con 100% de deuda.

<b>Esquema 3 (Caudal = 6xQ95%)</b>					
Tasa de interes bancos	9%	Costos de operación y mantenimiento (\$/kwh)			
Vida útil en años	25	0.015			
Ingreso anual con \$0.09/kwh	\$968,570.35	Tasa de descuento			
Deuda a financiar	\$15,620,558.32	15%			
<b>TIR</b>					
	Ingresos	Deuda	Intereses	Operación y mantenimiento	Saldo abonado a la deuda
n = 0	\$0.00	-\$15,620,558.32	-\$1,405,850.25	\$0.00	\$0.00
1	\$968,570.35	-\$17,026,408.57	-\$1,532,376.77	-\$123,284.69	-\$687,091.11
2	\$968,570.35	-\$17,713,499.68	-\$1,594,214.97	-\$123,284.69	-\$748,929.31
3	\$968,570.35	-\$18,462,428.99	-\$1,661,618.61	-\$123,284.69	-\$816,332.95
24	\$968,570.35	-\$64,801,185.39	-\$5,832,106.69	-\$123,284.69	-\$4,986,821.02
25	\$968,570.35	-\$69,788,006.42	-\$6,280,920.58	-\$123,284.69	-\$75,223,641.33

Fuente: Andrés Scheel



Con seis veces el caudal garantizado el 95% del tiempo se puede ver que la deuda con el banco se incrementa con el tiempo, es decir, que los ingresos no alcanzan para pagar ni siquiera los intereses. Hacer un análisis de TIR o valor presente no tiene sentido para este esquema. Este diseño no es económicamente viable.

## IX. CONCLUSIONES

1. El río Sayté, el río Chisay y la quebrada Muquilá tienen un caudal medio de 1.42 (m<sup>3</sup>/s), 3.57 (m<sup>3</sup>/s) y 0.31 (m<sup>3</sup>/s) respectivamente usando el criterio de evapotranspiración de Turc.

2. El área de las cuencas del río Sayté, el río Chisay y la quebrada Muquilá son de 26.55 (km<sup>2</sup>), 66.97 (km<sup>2</sup>) y 7.71 (km<sup>2</sup>) respectivamente.

3. Se analizaron los tres esquemas más adecuados según la topografía del lugar teniendo como criterio de la obra civil y limitación, las colindancias de la finca “El Paraíso de Secanquim”.

4. Para cada esquema se varió el caudal de diseño en positivo y negativo 20% que son estándares usados internacionalmente, adicionalmente se analizó con un caudal de seis veces el caudal garantizado el 95% del tiempo para los esquemas con presa por ser un criterio que asume regulación diaria acumulando el caudal 20 horas y liberándolo 4 horas usado en Guatemala.

5. Las estructuras impactadas significativamente por la variación del caudal de diseño son canales, tubería forzada, equipamiento del cuarto de máquinas y el equipamiento para la transformación del voltaje para estos esquemas puntuales.

6. Las estructuras impactadas de una manera despreciable por la variación del caudal de diseño son las presas o estructuras para desviar el río, los desarenadores, las cámaras de presión y el tamaño del cuarto de máquinas para estos esquemas puntuales.

7. Ninguna estructura para los tres esquemas de generación justificó satisfactoriamente su aumento de costo respecto al aumento de ingresos usando diferentes caudales de diseño. Esto es debido a que se tienen caudales relativamente grandes con caídas relativamente pequeñas teniendo la necesidad de grandes estructuras con poca generación.

8. De igual manera las estructuras que no cambiaban significativamente como presas tenían que ser muy robustas para resistir relativamente grandes embalses pero nuevamente con poca caída por lo que el costo no justificaba el ingreso.

9. Ningún esquema es económicamente viable financiado.

10. Los cálculos de los caudales, los costos e ingresos se hicieron de una manera conservadora para minimizar riesgos por lo que se podría tener en la realidad mayores ingresos y menores costos.



## X. RECOMENDACIONES

1. Bajo estos esquemas no se recomienda seguir con el siguiente paso del proyecto el cual sería un estudio de factibilidad.

2. Los caudales son relativamente grandes por lo que se recomienda un análisis de pre factibilidad similar buscando una mayor caída fuera de los límites de la finca “El Paraíso de Secanquim”.

3. Se puede lograr una caída de hasta 70 metros fuera de las colindancias de la finca El Paraíso de Secanquim antes de llegar al río Cahabón, pero se tendría que hablar con la comunidad vecina respecto a derechos de paso y permisos para hacer una canal, desarenador, cámara de presión, caída y cuarto de máquinas.

4. El esquema que se recomienda es usando una presa similar a la del esquema 3 para juntar los caudales del río Sayté, río Chisay y la quebrada Muquilá, pero buscando una mayor caída río abajo con el uso de un canal y reubicación del cuarto de máquinas y tubería forzada. Así mismo se tendría que buscar otro lugar de ser factible para la interconexión a la red nacional.

5. Si se quisiera generar energía dentro de los límites de la Finca El Paraíso de Secanquim, se recomienda no usar el caudal total de los ríos para tener costos pequeños en cuanto a estructuras, es decir, un esquema a filo de agua con una potencia instalada baja para solo vender energía sin garantizar potencia.

6. Se podrían cambiar los materiales usados para bajar costos, usar materiales locales, piedra, arena etc.

7. En general se recomienda plantear un esquema de generación pequeño si se determina seguir dentro de los límites de la propiedad para bajar los costos y analizar si así es rentable.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

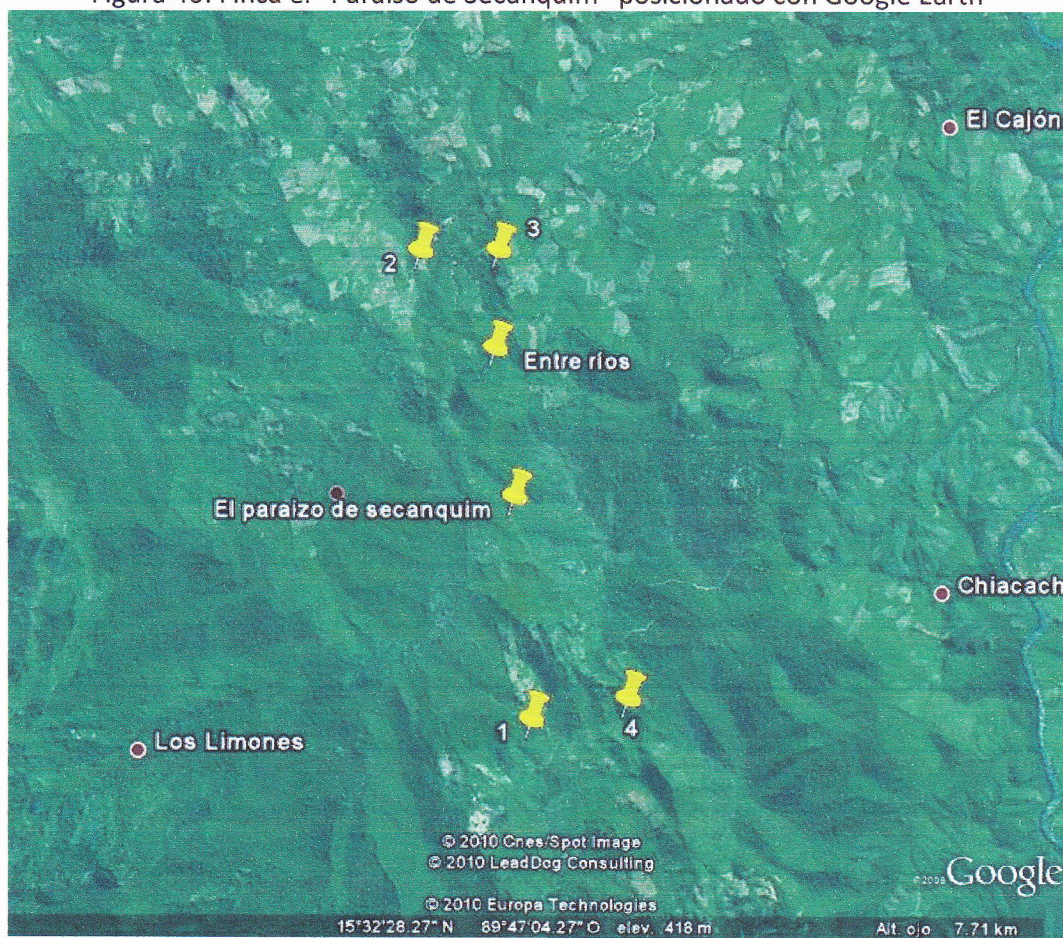
1. Blank, Leland; Tarquin, Anthony. *Ingeniería Económica*. Sexta Edición México D.F., Litográfica Ingramex, S.A. 816 páginas. 2006.
2. Brealey Richard; Myers Stewart. *Principles of Corporate Finance*. United States of America, McGraw-Hill, Inc. 794 páginas. 1981.
3. De la Peña, Ildefonso. *Manual del uso y manejo del agua de riego*. Patronato para la producción y extensión agrícola y ganadera. Cd. Obregón, Sonora, México. 186 páginas. 1987.
4. ESHA (European Small Hydropower Association). *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*. Belgium. 151 pages. 2004.
5. Flores, E.Z. *Hidrología Superficial*. Ed. Univ. Son. México. 183 páginas. 1978.
6. IGN (Instituto Geográfico Nacional). *Mapas actualizados con métodos fotoplanimétricos con fotografías aéreas*. Guatemala. 1984.
7. INDE (Instituto Nacional de Electrificación). *Situación del Subsector Eléctrico*. Guatemala. 49 páginas. 2007.
8. INSIVUMEH. *Atlas Hidrológico*. Guatemala, Departamento de Investigación y Servicios Hídricos. 2003.
9. Kaveshnikov Nikolai. *Cálculo de obras de toma*. Stroizdat. 100 páginas. 1989.
10. L. Streeter, Victor; E. Benjamin, Wylie; W. Bedford, Keith. *Mecánica de Fluidos*. Novena Edición Colombia, Quebecor World Bogotá S.A. 740 páginas. 2004.
11. Mayaniquel S.A.. *Reporte de Actividades Finca El Paraíso y Jalaute*. Guatemala. 12 páginas. 2008
12. Mora Navarro, Diego Camilo; Hurtado Liévano, Jorge Mauricio. *Guía para Estudios de Prefactibilidad de Pequeñas Hidroeléctricas como Parte de Sistemas Híbridos*. Bogotá D.C., Pontificia Universidad Javeriana. 183 páginas. 2004.
13. Paish Oliver; Needle Jon. *Hydropower at Brough Business Centre (Pre-Feasibility Study)*. USA. 2007.
14. Shterenlij David Veniaminovich. *Hidráulica*. Stroizdat. 550 páginas. 1988.
15. Tarano Pinto, Simmons. *Clasificación de Reconocimiento de los Suelos de la Republica de Guatemala*. Guatemala, Editorial del Ministerio de Educación Pública "Jose de Pineda Ibarra" 1000 páginas. 1959.

16. Varios autores. *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Electrobras. 1991.
17. Ven Te Chow. *Hidráulica de Canales Abiertos*. Colombia, Editorial Norma S.A. 667 páginas. 2005.



## X. APÉNDICE

Figura 40: Finca el “Paraíso de Secanquim” posicionado con Google Earth



Fuente: Google Earth

}



Figura 41: Colocación de varas de referencia



Fuente: Andrés Scheel

Figura 42: Varas colocadas a 5.5 metros de distancia entre si



Fuente: Andrés Scheel



Figura 43: Medición de la longitud transversal del río Sayté



Fuente: Andrés Scheel

Figura 44: Medición de la longitud transversal del río Sayté



Fuente: Andrés Scheel



Figura 45: Medición de la longitud transversal del río Sayté



Fuente: Andrés Scheel

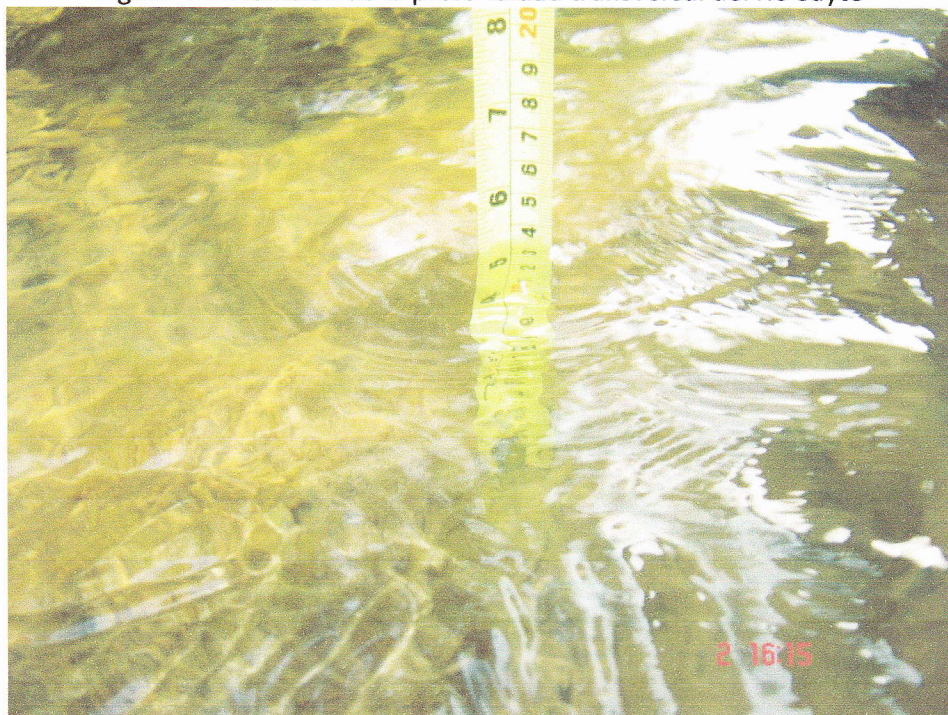
Figura 46: Medición de la longitud transversal del río Sayté



Fuente: Andrés Scheel

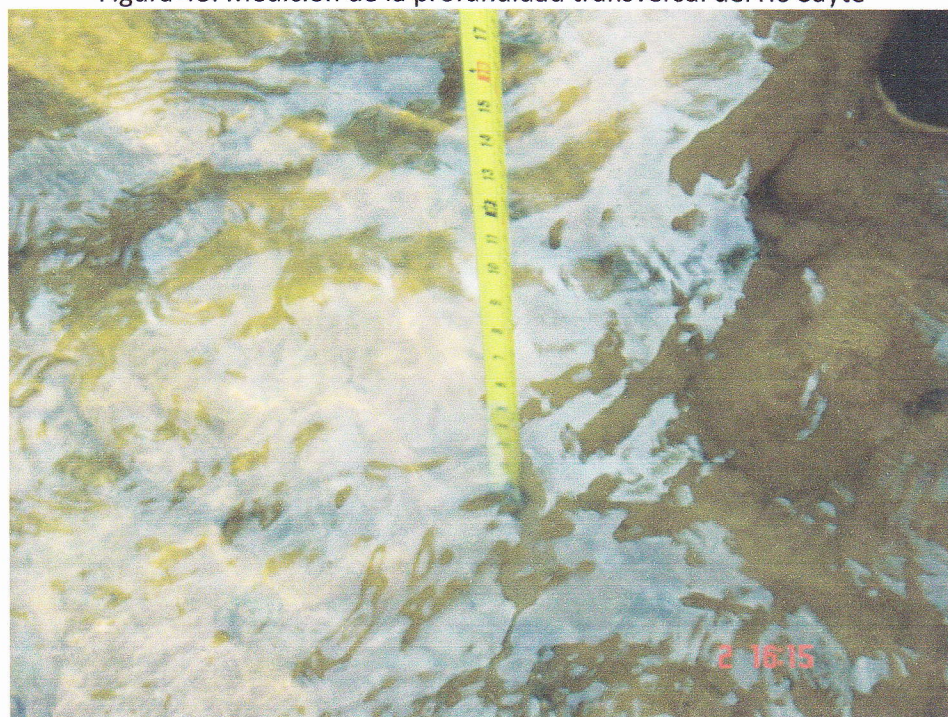


Figura 47: Medición de la profundidad transversal del río Sayté



Fuente: Andrés Scheel

Figura 48: Medición de la profundidad transversal del río Sayté



Fuente: Andrés Scheel



Figura 49: Flotador para la medición de la velocidad del río Sayté



Fuente: Andrés Scheel

Figura 50: Flotador para la medición de la velocidad del río Sayté



Fuente: Andrés Scheel



Figura 51: Fondo relativamente plano del río Sayté área de medición



Fuente: Andrés Scheel

Figura 52: Río Sayté y Río Chisay en el lugar de convergencia



Fuente: Andrés Scheel