



**UNIVERSIDAD DON BOSCO  
VICERRECTORÍA DE ESTUDIOS DE POSTGRADOS**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

**Estudio preliminar a la prefactibilidad de implementar una microturbina  
hidráulica para generación de energía eléctrica en río copinula, municipio  
de Jujutla, Ahuachapan**

**PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAESTRO EN GESTIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES**

**ASESOR:**

**Msc. ÁLVARO RENÉ FLAMENCO RAMOS**

**PRESENTADO POR:**

**CARLOS ORLANDO AZUCENA VÁSQUEZ**

**ERICK ALEXANDER BLANCO GUILLÉN**

**RODOLFO ANTONIO CASTRO LUNA**

**Antiguo Cuscatlán, La Libertad, El Salvador, Centroamérica**

**Marzo de 2012**

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
Resumen ejecutivo.....	VII
Agradecimientos.....	X
Introducción.....	XI
Objetivos y Alcance.....	XII
 <b>CAPÍTULO I. GENERALIDADES SOBRE LA HIDROLOGÍA DEL LUGAR</b>	
1.1 Ubicación y accesibilidad.....	1
1.2 El clima en Jujutla.....	5
1.3 Fisiografía.....	6
1.4 Temperatura de la zona.....	7
1.5 Precipitación.....	10
1.6 Vientos.....	15
1.7 Humedad relativa.....	21
1.8 Presión atmosférica.....	22
1.9 La Radiación, Luz Solar (brillo: horas de luz solar) y Nubosidad.....	23
1.10 El relieve (orografía de la zona).....	27
1.11 Hidrología del lugar. Recursos superficiales.....	30
1.12 Recursos acuíferos subterráneos.....	34
1.13 Drenaje.....	37
1.14 Balance hídrico microcuenca Río Copinula.....	40
1.15 Caudal en Río Copinula.....	44
1.16 Humedad del suelo.....	52
1.17 Evaporación.....	54
1.18 Evapotranspiración.....	54
1.19 Cálculo de evaporación en cuerpos de agua.....	56
1.20 Escorrentía superficial.....	63
1.21 Relación Precipitación – Escorrentía.....	66
1.22 Infiltración y recarga de lluvia.....	69
1.23 Cambio de Almacenamiento.....	71
 <b>CAPÍTULO II. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL HIDRÁULICO EN EL RÍO COPINULA.</b>	
2.1 Generalidades sobre las centrales hidráulicas.....	72
2.2 Cómo se origina la energía hidráulica.....	74
2.3 Potencial de la energía hidráulica en El Salvador.....	75
2.4 Medida del potencial hidráulico para un río.....	76
2.5 Medida del caudal en el río Copinula.....	76
2.6 Medida del salto bruto en el Río Copinula.....	88
2.7 Tipos de centrales hidráulicas más utilizadas.....	90
2.8 Herramientas de software para estimar potencial hidráulico.....	112
2.9 Tecnología recomendada en los saltos ubicados en Río Copinula.....	116
2.10 Valoración final del recurso hídrico de la microcuenca Copinula.....	116

### **CAPÍTULO III. CONSIDERACIONES PARA ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL**

3.1 Generalidades de un estudio de impacto ambiental.....	118
3.2 Evaluación y priorización de impactos.....	122
3.3 Programa de manejo ambiental.....	126
Conclusiones.....	130
Marco conceptual.....	132
Fuentes de consulta.....	136
Anexos.....	140
Anexo 1.1 Datos climáticos y Geológicos del País.....	141
Anexo 1.2 Mapas de Precipitación, medias mensual y anual del país.....	156
Anexo 2 Mapas de Evapotranspiración de Referencia (promedia mensual, anual), cambio de almacenamiento y escorrentía superficial.....	178
Anexo 3 Mapas de anomalías de lluvia en isoyetas de los escenarios secos y lluviosos.....	195
Anexo 4 Tabla de relaciones normalizadas para la medición de velocidad con medidor de corrientes de agua, de Instrumentos hidrológicos Rickly.....	202
Anexo 5 Ley de incentivos fiscales para el fomento de las energías renovables en la generación de electricidad.....	204
Anexo 6 Normativas y legislación relativas a los Recursos hídricos en El Salvador.....	210
Anexo 7 Características de una turbina Ossberger.....	220

### **ÍNDICE DE FIGURAS**

	<b>Página</b>
<b>CAPÍTULO I. GENERALIDADES SOBRE LA HIDROLOGÍA DEL LUGAR</b>	
1.1 Ubicación geográfica de Jujutla, entrada por la carretera “RN15”.....	1
1.2 Región C, formada por 5 cuencas una de ellas es la de San Pedro, a la que pertenece la microcuenca del Río Copinula.....	2
1.3 Entrada a Finca Copinula a través de carretera Nacional RN 15 S, con el visor de Google Earth® .....	2
1.4 Ubicación del lugar, en la región C; el círculo en negro ubica la zona.....	4
1.5 Ubicación geográfica de Jujutla (lugar de interés), Acajutla y Santa Ana donde se ubican las estaciones meteorológicas de referencia. ....	4
1.6 Temperatura media anual del aire en El Salvador, para la climatología.....	8
1.7 Temperatura seca y húmeda anual, en Acajutla y Santa Ana.....	9
1.8 Oscilación diaria de la Temperatura seca, en Acajutla y Santa Ana.....	9
1.9 Variación diurna de la Temperatura, en Acajutla y Santa Ana.....	10
1.10 Precipitación media anual para la climatología.....	12
1.11 Precipitación en la región C, incluida Jujutla.....	13
1.12 Precipitación media anual, en Acajutla y Santa Ana.....	14
1.13 Oscilación diaria de la lluvia, en Acajutla y Santa Ana.....	14
1.14 Variación diurna de la lluvia, en Acajutla y Santa Ana.....	15

1.15 Disponibilidad de potencia eólica en la zona de Jujutla. Los valores indicados de potencia definen las velocidades del viento a una altura de 50 m sobre el nivel superficial del río. ....	18
1.16 Variación diurna de la velocidad del viento, en Acajutla y Santa Ana.....	19
1.17 Variación diurna del rumbo del viento, en Acajutla .....	20
1.18 Oscilación diaria, de la humedad relativa cercana a Jujutla.....	21
1.19 Oscilación anual de la presión atmosférica, en Acajutla y Santa Ana.....	22
1.20 Oscilación diaria de la presión atmosférica en Santa Ana.....	23
1.21 Mapa de radiación (promedio anual) en KWh/m2/día para El Salvador...	25
1.22 Mapa de brillo solar (en horas de luz solar) para El Salvador. ....	25
1.23 Nubosidad y luz solar en Acajutla y Santa Ana.....	26
1.24 Oscilación diaria de la Nubosidad en Acajutla y Santa Ana.....	26
1.25 Relieve de la zona. El color denota la permeabilidad del substrato...	27
1.26 Relieve de la zona, a una altura sobre el nivel del mar entre 600 y 700 m.	28
1.27 Mapa pedológico en la ubicación del lugar de las caídas de agua.....	29
1.28 Microcuenca de análisis, en Río Copinula.....	33
1.29 Microcuenca de análisis, en Río Copinula. En línea Azul los ríos.....	33
1.30 Mapa de región C, acuíferos subterráneos.....	34
1.31 Mapa de mantos acuíferos de la zona, donde se define para los acuíferos subterráneos, .....	36
1.32 Extracciones aguas abajo del sitio de análisis, desde el río copinula, Cantón Morro grande (Guaymango).....	38
1.33 Extracciones superficiales de la región C, áreas regadas por Copinula...	39
1.34 Extracciones superficiales de la región C.....	39
1.35 Esquema simplificado de los principales componentes para cálculos de balance hídrico en la zona de las cascadas.....	42
1.36 Geometría de la cuenca del Río Copinula, aguas abajo del sitio de interés ...	44
1.37 Mapa donde se presentan las regiones hidrológicamente homogéneas...	46
1.38 Caudales de ríos de la región C, datos hidrológicos.....	47
1.39 Visor aéreo de la microcuenca Copinula,, área de análisis en el recuadro sombreado.....	51
1.40 Distribución de la aportación pluviométrica en sus diferentes componentes.....	53
1.41 Se verifica, la demanda externa de la zona es la extracción de 4 pozos..	55
1.42 Microcuenca Copinula o zona de análisis para la evaporación.....	56
1.43 Mapa de Evapotranspiración de referencia en marzo .....	59
1.44 Comparación entre el café sin sombra (cultivo en la microcuenca) .....	61
1.45 Datos acumulados de evatranspiración anual real (Se indica referencia de la zona).....	63
1.46 Se muestra en detalle la zona para la relación precipitación – escorrentía. 5.35 son los km. aguas arriba del análisis.....	65
1.47 Muestra los datos de precipitación – escorrentía de la zona de análisis, los cuales aparecen en la tabla 1.23.....	68
1.48 Cambio de almacenamiento regional, donde está indicado la micro cuenca Copinula; el cambio de almacenamiento es entre 300 a 500 mm.....	72

## **CAPÍTULO II. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL HIDRÁULICO EN EL RÍO COPINULA.**

2.1 Representación de ciclo hidrológico .....	74
2.2 Método para la determinación del área transversal .....	77

2.3 Determinación de área en el punto 1 del Río Copinula .....	78
2.4 Determinación de área en el punto 2 del Río Copinula.....	79
2.5 Molinete utilizado para medir velocidad en Río Copinula .....	81
2.6 Medición de velocidad en punto 1 de Río Copinula .....	81
2.7 Caudales medios mensuales aguas arriba de saltos en Río Copinula.....	86
2.8 Salto en el Río Copinula, En el lugar conocido como El Salto.....	88
2.9 Doble salto en el Río Copinula, En el lugar conocido como los encuentros..	89
2.10 Ejemplo de Tubería forzada dirigida hacia la casa de máquinas.....	92
2.11 Esquema de distribución de principales componentes de obra civil.....	93
2.12 Principio de funcionamiento de una central hidroeléctrica.....	95
2.13 Conjunto Turbina-Generador en central hidroeléctrica Río Sucio.....	96
2.14 Clasificación de las turbinas hidráulicas por el salto y forma.....	96
2.15 Rodete y álabes de una Turbina Pelton Típica.....	97
2.16 Rodete de una Turbina Francis.....	98
2.17 Velocidades específicas para varias tecnologías.....	99
2.18 Datos sobre las turbinas Banki - Mitchell.....	100
2.19 Curva Caudal – Salto para varias tecnologías de generación hidráulica....	101
2.20 Generador síncrono autoexcitado.....	103
2.21 Saltos a considerar para la estimación de energía eléctrica.....	109
2.22 Principales tipos de turbinas utilizadas en centrales hidráulicas.....	111
2.23 Pantalla introductoria del software utilizado para comprobar datos recabados en Río Copinula.....	112
2.24 Condiciones del sitio utilizadas en el software.....	113
2.25 Características del sistema a utilizar en Río Copinula.....	113
2.26 Pantalla en la que se estima la producción de energía anual.....	114
2.27 Características de la turbina Francis que se puede utilizar en la central del Río Copinula.....	114
2.28 Curva de eficiencia de la Turbina Francis seleccionada para Río Copinula..	115
2.29 Curva de potencia y duración de flujo de la turbina Francis.....	115
2.30 Otras alternativas de una turbina adaptable al cauce del río o a la tubería forzada de la propuesta.....	116

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
<b>CAPÍTULO I. GENERALIDADES SOBRE LA HIDROLOGÍA DEL LUGAR</b>	
1.1 Regiones climáticas según Koppen y Sapper-Lauer.....	7
1.2 Datos básicos de las regiones climáticas de El Salvador.....	7
1.3 Duración aproximada de las estaciones climáticas en El Salvador.....	11
1.4 Masas de aire más frecuentes sobre la zona .....	17
1.5 Duración astronómica del día (en horas).....	24
1.6 Unidad estratigráfica de la zona en Jujutla, finca Copinula .....	29
1.7 Ríos de la región C y cuencas a las que pertenecen.....	31
1.8 Descripción de ríos y drenajes principales de la región C.....	32
1.9 Área aproximada de las cuencas y drenajes de la región C.....	32
1.10 Disponibilidad de acuífero subterráneos en la Región C.....	35
1.11 Extracción de agua del Río Copinula .....	37
1.12 Demanda diaria de agua, para riego desde algunas subcuencas de la región C.....	38
1.13 Orden de drenaje de las cuencas de la región C.....	40

1.14 Factores de ajuste para el cálculo de caudales máximos.....	47
1.15 Ecuaciones de relación entre el valor medio de los caudales máximos $Q_{2.33}$ y el área de la cuenca.....	48
1.16 Cálculo de caudales máximos para la Microcuenca Copinula.....	49
1.17 Ecuaciones de regionalización de canales medios anuales y factores de distribución mensual.....	50
1.18 Caudales medios mensuales para cuenca y microcuenca Copinula.....	51
1.19 Ecuaciones de correlación – Altitud Evapotranspiración de Referencia...	58
1.20 Coeficientes de cultivo.....	61
1.21 Resultados mensuales con datos mensuales de evapotranspiración de referencia (ET0) en la micro cuenca.....	62
1.22 Datos de humedad del suelo, en Jujutla corresponde a un franco arcilloso..	63
1.23 Factores de relación Precipitación – Escorrentía, para cada mes del año, específicamente para la zona 1 (color verde), correspondiente a el área de interés.....	69
1.24 Valores de Porosidad eficaz de algunas rocas.....	71

## **CAPÍTULO II. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL HIDRÁULICO EN EL RÍO COPINULA.**

2.1 Capacidad de generación para diferentes tipos de instalaciones (OLADE)	73
2.2 Datos en río Copinula para determinar Área de punto 1 de interés.....	79
2.3 Datos en río Copinula para determinar Área de punto 2 de interés.....	80
2.4 Revoluciones de molinete para primer punto de interés.....	82
2.5 Revoluciones de molinete para segundo punto de interés.....	82
2.6 Datos para determinar la velocidad utilizando .....	83
2.7 Velocidades medidas en el río Copinula.....	84

## **CAPÍTULO III. CONSIDERACIONES PARA ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL**

3.1 Principales componentes a considerar en estudio de impacto ambiental...	120
3.2 Resultados de interacciones entre actividades del proyecto y factores ambientales .....	121
3.3 Cálculo del valor de impacto ambiental (VIA).....	123
3.4 Repetitividad, valoración y relevancia de los impactos ambientales negativos.....	124
3.5 Descripción de los potenciales impactos ambientales significativos que generara el proyecto.....	125
3.6 Medidad ambientales propuestas para los impactos identificados con significancia negativa.....	127

## **Resumen Ejecutivo.**

Se realizó una investigación de campo, referente a la disponibilidad de recurso hídrico a ser aprovechable para generación eléctrica. En el municipio de Jujutla, departamento de Ahuachapan al occidente del país, en la zona de cantón el amate, finca Copinula corre el Río de nombre Copinula en el cual existen dos caídas de agua (cascadas: Los Encuentros: 13°47'42.82"N, 89°50'52.29"O; El Salto: 13°47'49.95"N, 89°51'6.83"O), las cuales fueron parte de nuestro trabajo.

El estudio se basa principalmente en tres componentes fundamentales, los cuales tienen que ver con las características propias del lugar, la estimación del potencial hidráulico y las consideraciones que se deben tomar en cuanto al impacto ambiental que puede ocasionar la implementación de una minicentral hidráulica.

Se establece de manera general, las condiciones propias del lugar, considerando para ello los accidentes geográficos de la región, así como el comportamiento del ciclo hidrológico en la zona con base a datos publicados por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) y datos medidos en el lugar con instrumentación destinada para este fin: Altura entre 600 y 700 msnm; La temperatura media anual en la zona, es de 24.8 °C, máximo de precipitación de 500 mm, una velocidad promedio del viento a 1m sobre el nivel del río de 2 m/s; 85 % de humedad relativa máxima en mes de septiembre, específicamente entre las 9 a 10 pm. En el mes de mayo se presentan los valores de presión atmosférica más bajos (1008.1 y 929.7 mb) asociados a sistemas de bajas presiones y al acercamiento la de la Zona de Convergencia intertropical (ZCIT).

El río pertenece a la cuenca de la región C, de nombre San Pedro y para la *microcuenca* Copinula, se espera tener un caudal máximo cada 5 años de

aproximadamente  $231.8 \text{ m}^3/\text{s}$ . En el río se da un mínimo de caudal mensual de  $0.55 \text{ m}^3/\text{s}$ , un promedio mensual de  $1.56 \text{ m}^3/\text{s}$  y un máximo mensual de  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Los datos de escorrentía superficial en la microcuenca rondan a un valor máximo de  $176.4 \text{ Hm}^3$  y un cambio de almacenamiento entre 300 a 500 mm.

Además, con este tipo de estudio, se estima el potencial hidráulico que se puede obtener del lugar, con base principalmente a mediciones de caudal y al salto o caída que presenta una de las cascadas, con lo cual, se calcula teóricamente la potencia eléctrica en kilowatts que se puede generar, considerando para ello, el caudal a turbinar, el caudal ecológico y las pérdidas que se pueden dar en los equipos utilizados con el conjunto turbina-generator, teniendo esta información, se sugiere el tipo de turbina comercial que cumpla con las condiciones de caudal, salto y potencia a generar.

Con el estudio realizado, se midieron y calcularon caudales de  $0.452 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $0.489 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente para los dos puntos de interés, así como unas alturas de 42 m y 40 m respectivamente; sin embargo, el caudal del segundo punto se estimó con base a registros históricos y posee un valor promedio de  $1.5717 \text{ m}^3/\text{s}$ , según la metodología utilizada, este caudal no es el que se utiliza para calcular la potencia teórica, pues debe de restársele el caudal ecológico, el cual se calculó utilizando la fórmula conocida como CEMAGREF, cuyo resultado para el caudal ecológico de  $0.039 \text{ m}^3/\text{s}$ , por lo que el caudal que se define hacia la turbina es de  $1.5327 \text{ m}^3/\text{s}$ ; trabajando con una altura aproximada de 40 m lo que corresponde al segundo punto de interés (El Salto).

Con base a esos datos, se estima una potencia teórica de 600 kWe, sin embargo si se consideran las eficiencias de los equipos y las posibles pérdidas la potencia teórica estimada se estableció en 400 kWe.

El análisis de las variables ambientales y de potencia hidráulica, confieren la posibilidad de poder realizar un estudio más exhaustivo para definir

parámetros de diseño; lo anterior es significativo si los interesados (Borja Nathan) quisiesen invertir en generar energía, pues las condiciones geográficas e hidrológicas de la zona permiten trabajar en un diseño *ecoeficiente* al entorno actual.

Es importante recalcar que los resultados obtenidos es parte de una etapa previa a la prefactibilidad por lo que no se han considerado todos los factores económicos que sirven de base para una evaluación económica del proyecto, sin embargo, a lo largo del estudio se presenta información valiosa que proporciona las líneas hacia las cuales debe encaminarse un estudio de prefactibilidad.

## **AGRADECIMIENTOS**

En estas líneas queremos manifestar nuestros más profundos agradecimientos por el apoyo brindado al desarrollo de nuestro trabajo de graduación para obtener el título de Maestro en Gestión de Energías Renovables.

Queremos de manera muy especial, agradecer a Borja Nathan quienes permitieron que en la Finca Copinula, a Ing. Atilio Zepeda Magaña, Tec. Julio cesar Pimentel, Ing. Salvador Delgado y el grupo de Trabajadores por su apoyo incondicional y guía a las cascadas, dentro de la finca para acompañarnos en el trabajo realizado en el Río Copinula, personas sin las cuales, no se habría podido llevar a cabo el estudio del potencial hidráulico.

Esperamos que esta experiencia no sea la primera ni la última, para compartir los resultados obtenidos en nuestro trabajo de graduación con Borja Nathan.

Además, agradecemos de manera muy especial, a la Sala Científica Estadounidense para la investigación en energía, principalmente al Ingeniero Anselmo Valdizón Evangelista, por su apoyo profesional, así como por el préstamo del equipo necesario para realizar mediciones de la velocidad en ríos, equipo sin el cual, no se habría podido llevar a cabo el estudio del potencial hidráulico.

Reiterando nuestro agradecimiento, nos despedimos.

Atentamente

Carlos Orlando Azucena Vásquez

Erick Alexander Blanco Guillén

Rodolfo Antonio Castro Luna

## INTRODUCCIÓN

El análisis que se presenta, contiene datos con los cuales se puede iniciar un proyecto de factibilidad para potenciar la generación de energía eléctrica, utilizando el agua del Río Copinula y el Río los Apantes mediante uso de mini central hidroeléctrica, para servicio domiciliario en los caseríos vecinos a la población de Jujutla, departamento de Ahuachapán, a la vez de mejorar la calidad del servicio eléctrico en la zona.

La disposición de agua para el mejoramiento en la calidad de vida, el desarrollo productivo y el mantenimiento de la biodiversidad es clave en nuestro país. Según la Constitución de la República de El Salvador, el uso del agua está destinado prioritariamente para abastecer la demanda humana; la cual es solventada a través de acuíferos subterráneos y ríos. Secundariamente, el agua se utiliza para fomentar el desarrollo industrial, productivo y para fines recreacionales o turísticos.<sup>1</sup>

La zona Sur de Ahuachapán forma parte de la región conocida como Cara Sucia-San Pedro Belén, también denominada como Región hidrológica C, que se caracteriza por contar con potenciales hídricos superficiales y subterráneos, se extiende desde la cordillera de Apaneca hasta el Océano Pacífico. Tal región, se subdivide en cinco cuencas: Cara Sucia, Cuilapa, bocana de San Juan, Cauta y San Pedro. Cuenta con un área de 674.4 km<sup>2</sup> abarcando los siguientes municipios en el departamento de Ahuachapán: San Francisco Menéndez, Jujutla, Guaymango y San Pedro Puxtla. En el departamento de Sonsonate están: Acajutla y Santo Domingo de Guzmán. El río Copinula o sub cuenca del río Copinula, es parte de la cuenca San Pedro, en el cual existen dos caídas de agua (cascadas) que son de interés para estimar el potencial hidráulico que se puede obtener del Río Copinula.

---

<sup>1</sup> UICN. Proyecto BASIM. *Análisis de actores de la región hidrográfica Cara Sucia-San Pedro Belén, Ahuachapán, El Salvador* / UICN. Proyecto BASIM. - 1. ed. San José, C.R.: UICN. Oficina Regional para Mesoamérica, 2005.

## **Objetivos y alcance**

Se elaboró el estudio preliminar sobre la disponibilidad de recurso Hidroeléctrico en cantón Los Amates, finca Copinula Nathan, ubicado sobre el Río Copinula y su ramal “Los Apantes”, Municipio de Jujutla, Departamento de Ahuachapán, República de El Salvador, para que sirva de información básica para futuras consideraciones en el desarrollo de un estudio de factibilidad a la construcción de todos los elementos necesarios para la generación energética.

### **Objetivo General**

“Realizar un estudio de reconocimiento y análisis básico de los recursos hídricos y condiciones naturales existentes en el municipio de Jujutla, departamento de Ahuachapán para cuantificar teóricamente el potencial hidráulico disponible para generación de energía eléctrica en dicho municipio”.

### **Objetivos Específicos:**

- Describir las condiciones geográficas que rodean al río Copinula.
- Describir las condiciones de micro cuencas de interés en la zona.
- Realizar mediciones de caudal y salto en el Río Copinula y en el ramal los apantes de Jujutla.
- Calcular teóricamente la potencia eléctrica que se puede obtener con base a mediciones de caudal y salto realizadas en el lugar de interés.
- Determinar los efectos positivos y negativos que conlleva este tipo de generación de energía en relación al medio ambiente en Jujutla.
- Documentar los procedimientos realizados en cuanto a mediciones y los resultados obtenidos
- Recomendar el tipo de minicentral de acuerdo a la zona y recurso existente

**Alcance.**

El alcance del trabajo consistió, en realizar investigaciones básicas en cuanto a geología de la zona de proyecto, presentando además, estudios básicos de hidrología y estimaciones de potencia. Se tomó en consideración toda la información actualizada de lluvia existente en la zona, así como un aforo realizado en el Río Copinula y su ramal “Los Apantes”, para generar una serie de caudales promedios diarios y determinar la curva de duración de caudales. Esta información fue muy importante para determinar la disponibilidad de agua, la potencia y estimar la producción de energía de una futura micro central.

**Se enlistan los detalles de los alcances:**

- ✓ Presentar un documento, estableciendo los probables efectos positivos y negativos que conlleva este tipo de generación, en relación al medio ambiente en la zona.
- ✓ Establecer una metodología de los procedimientos utilizados para la determinación del potencial de generación en la zona.
- ✓ Presentar resultados obtenidos de las mediciones preliminares, relacionadas con caudal y salto hidráulico.
- ✓ Estimar preliminarmente el aprovechamiento del caudal considerando, caudal ecológico y caudal mínimo de operación.
- ✓ Justificar la recomendación del tipo de tecnología de acuerdo a la zona y recurso existente.

## CAPÍTULO I. GENERALIDADES SOBRE LA HIDROLOGÍA DEL LUGAR.

### 1.1 Ubicación y accesibilidad

Jujutla, se ubica dentro de “la región hidrológica C” de nuestro país, el Sur Occidental de El Salvador casi fronterizo con Guatemala, tal región se extiende desde la cordillera de Apaneca hasta el Océano Pacífico. Dentro de la cual se ubica el cantón Amate, finca la Copinula, lugar donde se analiza el potencial de generación en 2 puntos donde existen caídas de agua sobre el río Copinula.

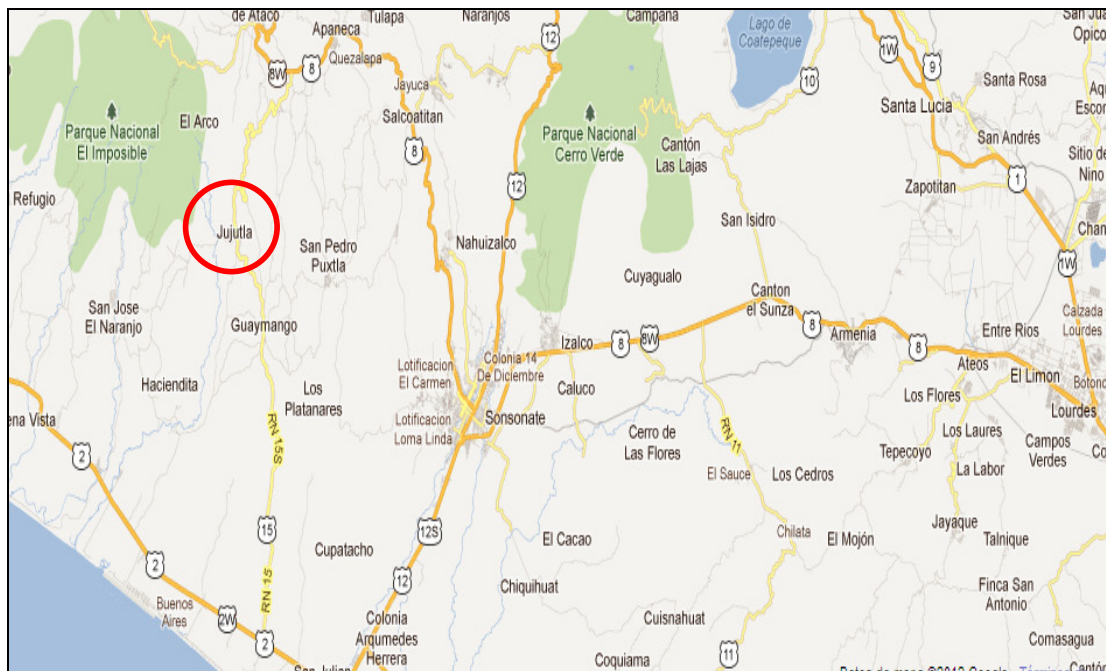


Figura 1.1. Ubicación geográfica de Jujutla, en el mapa aparece las carreteras de acceso, la carretera “RN15” es la de acceso. Fotografía electrónica captada desde Google maps®.

La región, hidrográficamente se subdivide en cinco cuencas: Cara Sucia, Cuilapa, bocana de San Juan, Cauta y San Pedro. Cuenta con un área de 674.4 km<sup>2</sup>, como puede observarse en figura 1.2.

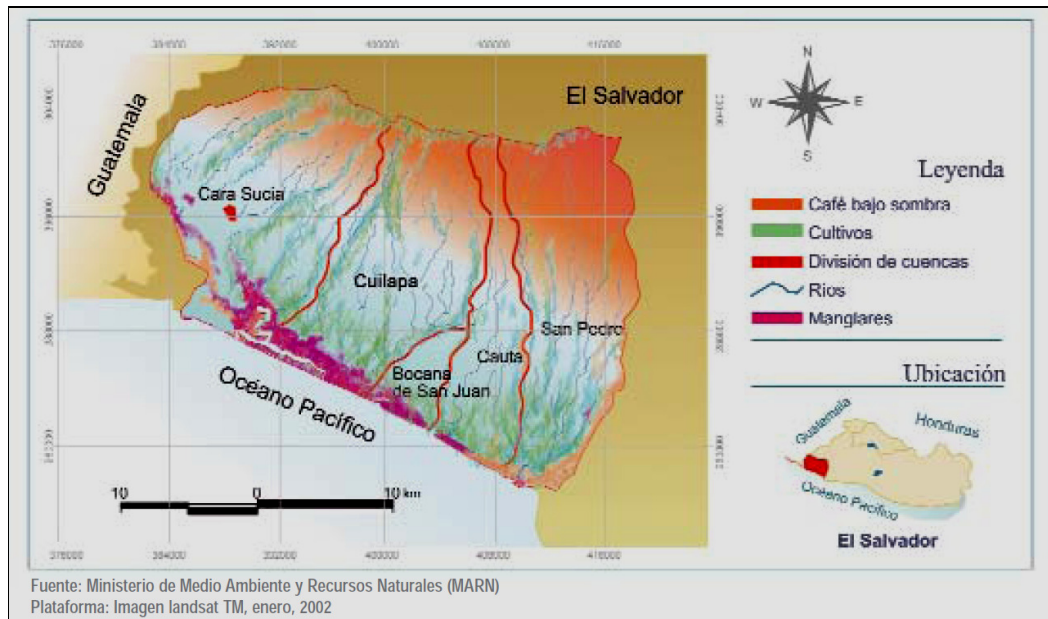


Figura 1.2. Región C, formada por 5 cuencas una de ellas es la de San Pedro, a la que pertenece la microcuenca del Río Copinula, ubicación de los saltos hídricos (Cascadas) que se analizan en este documento.<sup>1</sup>

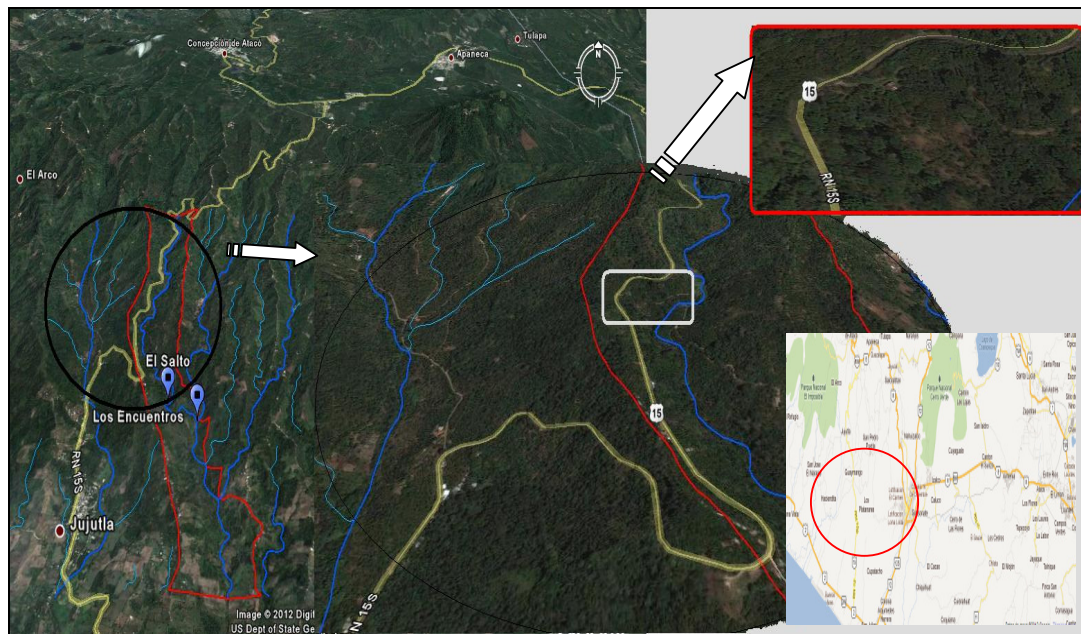


Figura 1.3 Entrada a Finca Copinula a través de carretera Nacional RN 15 S. En la figura, se muestran 3 diferentes acercamientos y un mapa del acceso a la finca. Tomados con el visor de Google Earth®.

<sup>1</sup> Tomado de página 9, fuente de consulta 1.

El acceso a la zona de las cascadas, es en terrenos de la finca de café “La Copinula” de la empresa “J. J. Borja Nathan, S. A.” cafetaleros de estirpe, empresarios de corazón, salvadoreños nacidos en Ahuachapán. Quienes tienen cultivos de café “Arábico” en fincas ubicada en la cordillera Apaneca-Illamatepec; el acceso vehicular y peatonal es por la carretera Jujutla-Apaneca – Ahuachapán. Ver figura 1.3 para mayor detalle.

Jujutla es un municipio del departamento de Ahuachapán, que limita con los municipios de Concepción de Ataco por el norte. San Francisco Menéndez y Tacuba la oeste, Acajutla y Guaymango por el sur y el este.

Los moradores de Jujutla y sus cantones, específicamente cantón el amate, serían los beneficiarios directos de la ejecución a proponer, lugar donde se ubican las cascadas de interés, cuyas coordenadas cartográficas son:

Los Encuentros:	13°47'42.82"N, 89°50'52.29"O
El Salto:	13°47'49.95"N, 89°51'6.83"O

El municipio tiene un área de 263.95 km<sup>2</sup>, que según el censo del 2007<sup>2</sup>, tiene una población de 39,596 habitantes y ocupa el puesto número 49 a nivel nacional en población.

La región (Ver figura 1.4) comprende las pequeñas cuencas que drenan desde las montañas de Tacuba y de los volcanes de Santa Ana (Cordillera Imposible-Apaneca-Illamatepec) hacia la costa del Océano Pacífico, y tiene un área de drenaje total de 658.6 Km<sup>2</sup>. La región está casi totalmente comprendida en el departamento de Ahuachapán y una pequeña parte en el departamento de Sonsonate.

Debido que en Acajutla y en Santa Ana se tiene registro de información meteorológica y pluvial en un período de 30 años (1970 – 2000), los cuales sirven de referencia al proyecto, se incluye a continuación un mapa de ubicación de los puntos de interés. Ver figura 1.5.

---

<sup>2</sup> Tomado de fuentes de consulta 18.

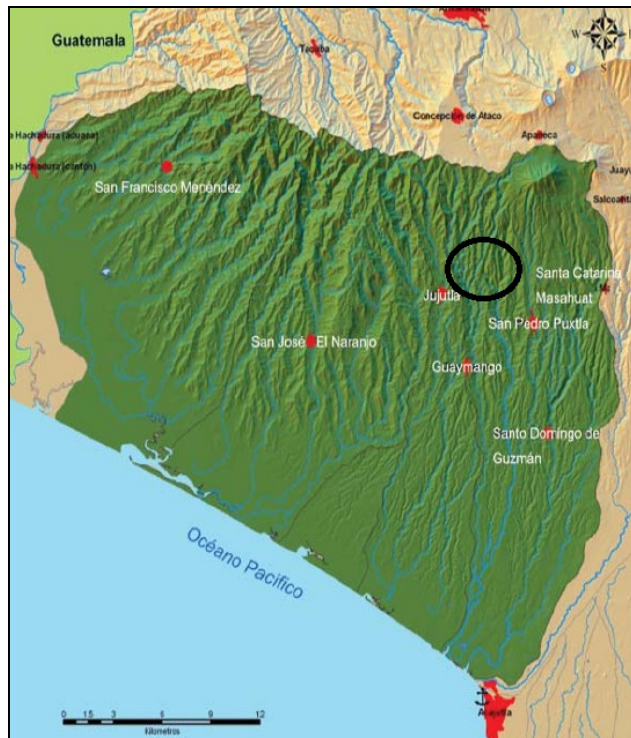


Figura 1.4 Ubicación del lugar, en la región C; el círculo en negro ubica la zona.<sup>3</sup>

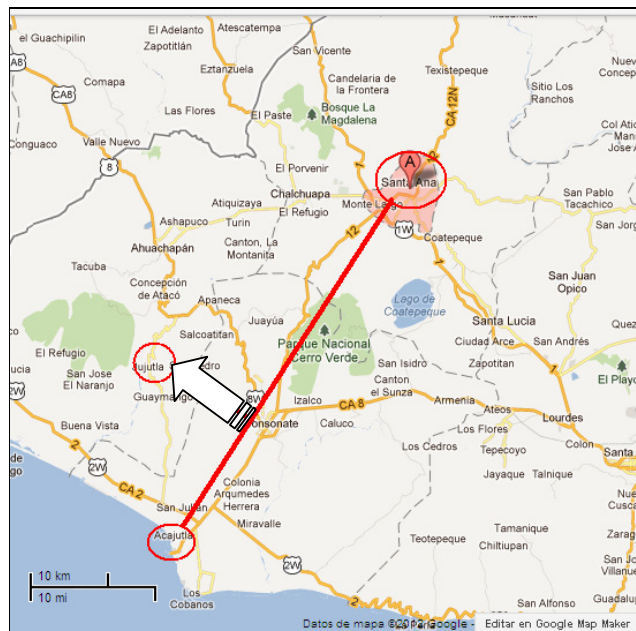


Figura 1.5. Ubicación geográfica de Jujutla (lugar de interés), Acajutla y Santa Ana donde se ubican las estaciones meteorológicas de referencia. Imagen tomada desde Google map ®.

<sup>3</sup> Tomado de página 18, fuente de consulta 1.

## 1.2 El Clima en Jujutla

Entre los factores más importantes que determinan el clima de un determinado lugar, se deben considerar los astronómicos relacionados con la tierra y su posición con relación al Sol. De igual forma se deben considerar los factores geográficos relacionados con la latitud ( $13^{\circ} 47'$ ), longitud ( $89^{\circ} W$ ) y altura de un lugar (600 a 700 msnm), así como los factores del uso de suelo (cafetal), incluyendo su cercanía al mar (en un radio menor a 12 mi). En un momento y lugar determinados a lo largo de la rivera del río Copinula, las condiciones meteorológicas se pueden definir en términos de la energía solar recibida, la presión atmosférica, la temperatura local (seca o húmeda), la humedad relativa en el ambiente, y los vientos; parámetros que cambian continuamente.

Debido que las condiciones climáticas juegan un papel determinante en la evaluación del recurso en El Salvador, situado en la parte exterior del Cinturón Climático de los Trópicos (tropical exterior), caracterizado por tener unas propiedades térmicas casi constantes durante todo el año y dos estaciones muy marcadas, una lluviosa y otra seca. Las precipitaciones se concentran casi exclusivamente durante la estación lluviosa, si bien, dentro de ella pueden aparecer grandes oscilaciones [16].

En nuestro país, las diferencias climáticas están dadas por la lluvia, la referencia climática de la zona debe ser elaborada de forma que permita tipificar las condiciones climáticas actuales, lo cual está determinado por varios aspectos, entre los cuales se encuentran: i) ser representativa de las condiciones climáticas medias recientes en la región de interés; ii) ser de suficiente duración para poder considerar un rango importante de variaciones climáticas, incluyendo un número significativo de anomalías (p. ej. sequías severas, períodos anormalmente fríos, etc.), tales anomalías permitirían evaluar los impactos de la variabilidad climática extrema en condiciones actuales; iii) representar un período para el cual los datos son abundantes, fácilmente accesibles y adecuadamente distribuidos en el orden espacial; iv)

incluir datos de adecuada calidad y v) ser consistente o fácilmente comparable con las referencias utilizadas en estudios desarrollados sobre otras regiones. [11]

Los factores que condicionan el régimen climático de la zona son:

- ✓ El relieve del lugar, es escabroso y con muchas pendientes muy pronunciadas a ambos lados del río.
- ✓ La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) sobre el océano pacífico.
- ✓ Los vientos Alisios del NE que vienen del mar Caribe.
- ✓ Las ondas tropicales o del Este.
- ✓ La influencia de la brisa marina del océano Pacífico (vientos alisios del SW), pues la costa se tiene en un radio de aproximadamente 35 km.
- ✓ El anticiclón subtropical del Atlántico o de las Islas Bermudas (sistema de alta presión).
- ✓ Los frentes fríos desplazados por masas de aire frío y continental de origen polar.
- ✓ Los centros térmicos débiles de baja presión atmosférica.
- ✓ Los sistemas ciclónicos como tormentas tropicales y huracanes. [10]

En gran medida, la estación seca o lluviosa es el resultado de la posición de la ZCIT. Entre noviembre y febrero, la ZCIT se desplaza hacia el ecuador geográfico por lo que sobre El Salvador y la zona de análisis disminuye la humedad y la circulación atmosférica descendente e inhibe la formación de nubes, resultando en la temporada seca. De junio a septiembre, ésta se ubica entre los 10 y 12°N, debido a lo cual la humedad, las nubes y las lluvias se aproximan a El Salvador, produciendo la temporada de lluvias [16].

### **1.3 Fisiografía**

De acuerdo a la clasificación de Köppen, Sapper y Laver se establecen en la Región C las siguientes zonas climáticas (PRISMA, 1981):

**Tabla 1.1** Regiones Climáticas según KOPPEN Y SAPPER-LAUER.

REGIONES CLIMÁTICAS SEGÚN KOPOEN y SAPPER - LAUER		
Altura sobre el nivel del mar (msnm)	KOPPEN	SAPPER-LAUER
0 - 800	Sabanas Tropicales Calientes	Tierra Caliente
800 - 1.200	Sabanas Tropicales Calurosas	Tierra Templada
1.200 – 1.800	Clima Tropical de las Alturas	
1.800 - 2.700		Tierra Fría

Fuente: Atlas de El Salvador, cuarta edición, Ministerio de Economía)

**Tabla 1.2** Datos básicos de las regiones climáticas de El Salvador.

REGION CLIMATICA SABANA TROPICAL CALIENTE (TIERRA CALIENTE O ZONA TROPICAL ARIDA BAJA)	
SUPERFICIE DEL PAIS	90%
ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR	0 - 800 msnm
TEMPERATURA MEDIA	Oscila entre los 22-27°C y 22-28°C, en función de la elevación, en las planicies interiores. Extremos absolutos de 38°C en la región hidrográfica H y 35°C en la zona costera de las regiones hidrográficas F, e y C.
PRECIPITACION MEDIA MENSUAL	Oscila entre los 150-200 mm (excepto el entorno del lago Guija y sectores del oriente de la República).
HUMEDAD RELATIVA	70% en la estación seca 84% en la estación lluviosa
FUENTE: PNUD-OPS/OMS-ANDA-OEDA. Desarrollo de los Recursos Hidráulicos en El Salvador. San Salvador, El Salvador, febrero de 1989	

#### 1.4 Temperatura en la zona.

La División Técnica de Servicio Meteorológico Nacional<sup>5</sup>, realiza el cálculo de la temperatura media, mediante la expresión:

$$T_m = \sum \frac{t_d}{n}; \text{ con } t_d = \frac{(t_{07} + t_{14} + t_{21})}{4} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde:  $T_m$  es la temperatura media mensual,  $t_d$  es la temperatura media diaria, “n” es la cantidad de días involucrados,  $t_{07}$ ,  $t_{14}$ ,  $t_{21}$  son las temperaturas secas del aire registradas a las 07,14 y 21 horas, respectivamente. El clima de la zona de análisis es caluroso y las temperaturas oscilan entre 22 y 27°C. El descenso de la temperatura es aproximadamente 0.6 °C por cada 100 m.

<sup>4</sup> Tomado de páginas 28, 29. Fuente de consulta 10.

<sup>5</sup> Tomado de página 7. Fuente de consulta 11.

La temperatura media anual en la zona, es de 24.8 °C, presentándose la temperatura media más baja en los meses de diciembre y enero, debido a la influencia que ejercen los vientos fríos, por las incursiones de aire frío proveniente del Norte, mientras que el mes más cálido es abril [10]. La temperatura media seca y húmeda tiende a incrementarse entre los meses de marzo y mayo, sobrepasando los 20.0 °C; el rango de variación entre las temperaturas de la mañana y la tarde es mayor en los meses de la época seca. Los registros de las temperaturas mínimas son los más bajos en los primeros meses del año (< 17 °C) asociadas a la presencia de masas de aire frío y las temperaturas máximas alcanzan los valores más altos (> 30 °C) entre los meses de marzo y abril debido a que en esa época las masas de aire son de sistemas de alta presión, disminuyendo la mezcla vertical del aire y vapor, aumentando la inversión térmica cerca de superficie de análisis.

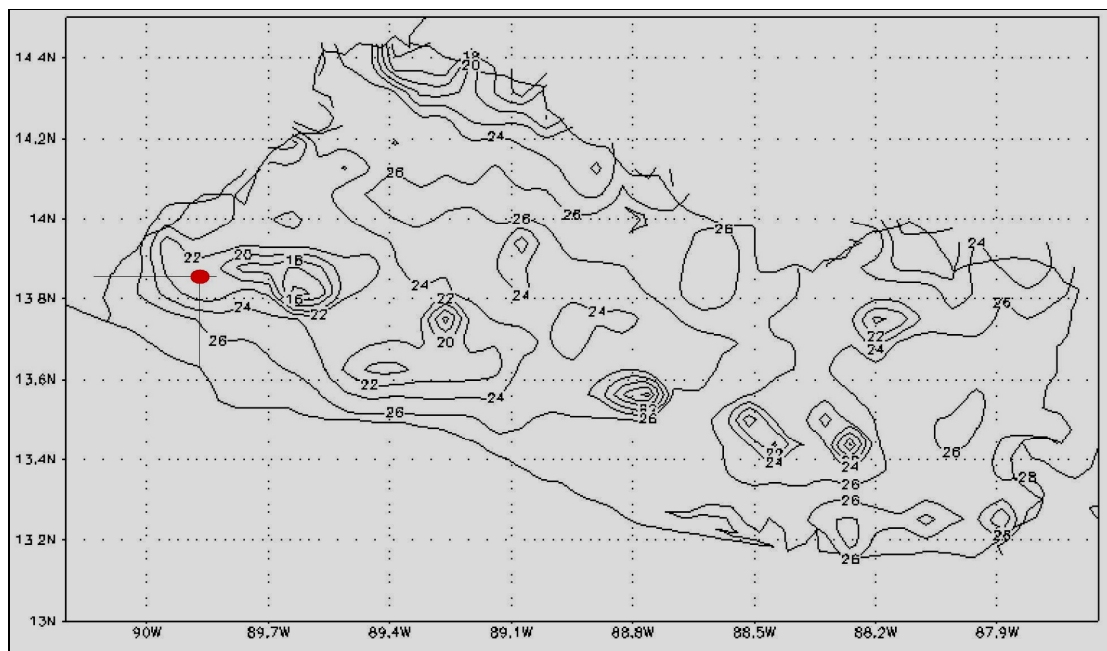


Figura1.6. Temperatura media anual del aire en El Salvador, para la climatología.<sup>6</sup>

En los meses de marzo y abril es donde, se presentan las mayores inversiones térmicas durante el día. Esto se asocia a cielos despejados, la

<sup>6</sup> Tomado de página 12 Fuente de consulta 11.

radiación solar aumenta el calor de la superficie del suelo durante ese tiempo. Al contrario de la época lluviosa, en donde las variaciones de durante el día son menores de 9 °C.

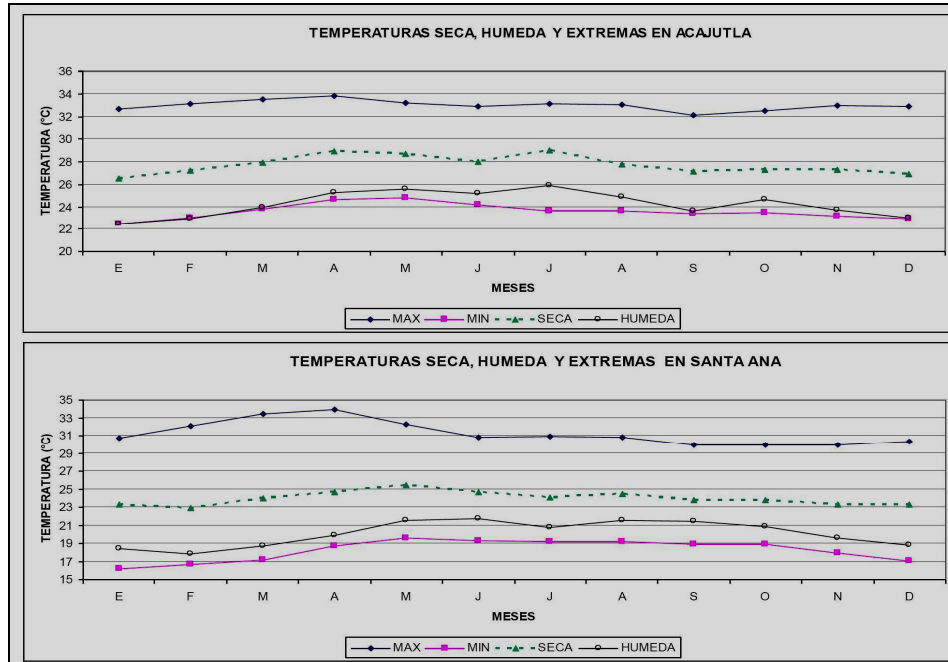


Figura 1.7. Temperatura seca y húmeda anual, en Acajutla y Santa Ana.

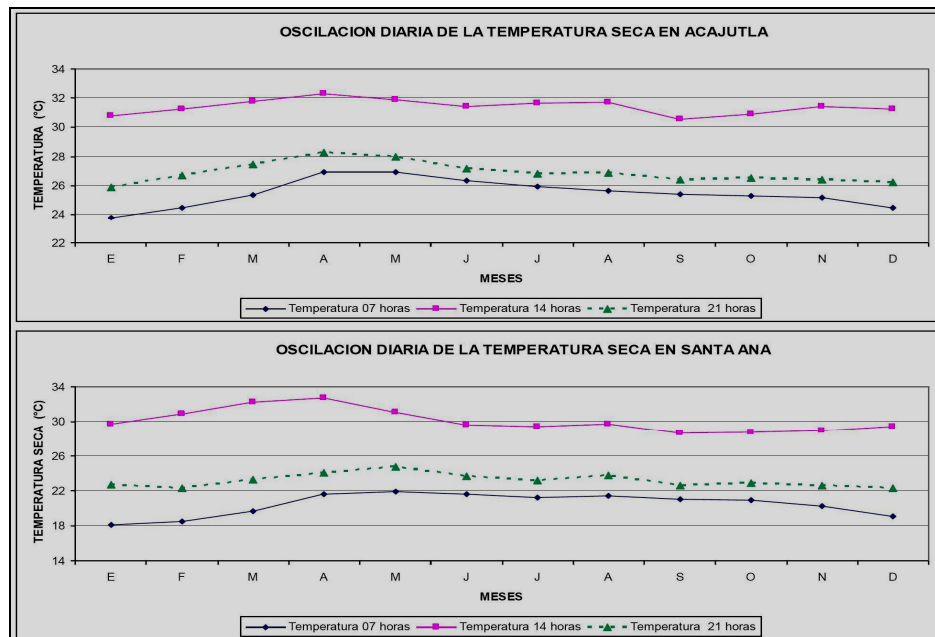


Figura 1.8. Oscilación diaria de la Temperatura seca, en Acajutla y Santa Ana.

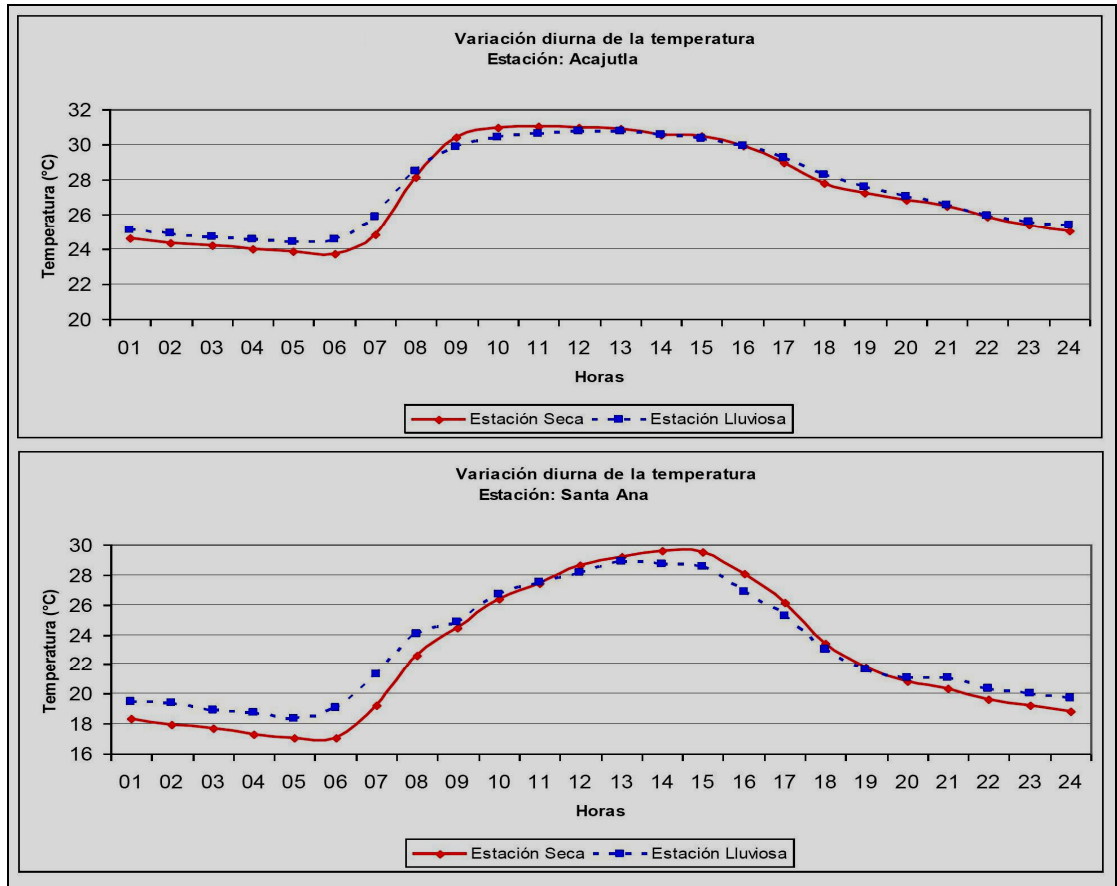


Figura 1.9. Variación diaria de la Temperatura, en Acajutla y Santa Ana.<sup>7</sup>

### 1.5 Precipitación.

La estación seca se presenta durante el semestre invernal que comprende los meses de noviembre a abril, presentándose las máximas temperaturas al final de la misma, en el mes de abril, antes del comienzo de la estación lluviosa. Con los datos obtenidos a lo largo de más de 50 años, se han podido establecer unas fechas promedio para el comienzo y el final de las dos estaciones, así como para los intervalos de transición que hay entre ellas (Ver Tabla 1.3)<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> Figuras 1.7 – 1.9, Tomado de anexos. Fuente de consulta 16.

<sup>8</sup> Tomado de página 1 - 2. Fuente de consulta 3.

Tabla 1.3 Duración aproximada de las estaciones climáticas en El Salvador.

Época del año	Principio	Final	Días
Estación seca	14 noviembre	19 abril	157
Transición seca-lluviosa	20 abril	20 mayo	31
Estación lluviosa	21 mayo	16 octubre	149
Transición lluviosa-seca	17 octubre	13 noviembre	28

Fuente: Caracterización de los riesgos geológicos y dimensionamiento de los recursos hidrogeológicos de Nejapa realizado por Geólogos del Mundo y UCA en agosto de 2003.

Los tipos de lluvia que se presentan en la zona son de origen: orográfico (resultado de vientos forzados verticalmente por el relieve, debido a la orientación de Centroamérica: Noreste - Sureste), convectivo y ciclónico [ 17]. La precipitación orográfica se origina en la zona de barlovento (lado que da el viento) de las cadenas montañosas del norte y costera, que modifica el viento alisio de bajo nivel. La precipitación convectiva se genera debido al calentamiento de masa de aire lo que origina precipitaciones fuertes y rápidas generalmente en horas de la tarde, especialmente en los primeros meses de la época lluviosa. Las precipitaciones ciclónicas son originadas por sistemas atmosféricos como ondas tropicales, bajas presiones y vaguadas, así como por la influencia o acercamiento de la zona de convergencia intertropical, que afectan al país especialmente en los últimos meses de la época lluviosa, generando temporales de varios días consecutivos.

El comportamiento bimodal (dos estaciones lluviosas y dos estaciones secas) de la época lluviosa es entre mayo y octubre; Con respecto a la oscilación diaria de la lluvia durante el año se observa que en horas de la noche y en la madrugada llueve mas con respecto a las horas de la tarde ó la mañana. [16]

También, el país es afectado periódicamente por el fenómeno “El Niño Oscilación del Sur” (ENOS). El fenómeno del Niño genera retraso de la llegada de la estación lluviosa y un periodo más corto de la misma, así como una disminución en su cantidad, y una prolongación de la canícula (período más caliente del verano). Ver anexo 1 para mayor detalle.

La lluvia en la zona es aproximadamente cercana a los 1900 milímetros anuales; La actividad lluviosa comienza en el Oeste y termina en el Este. En el Anexos 1.1 y 1.2, aparecen una serie completa de mapas con los patrones mensuales de temperatura y precipitación.

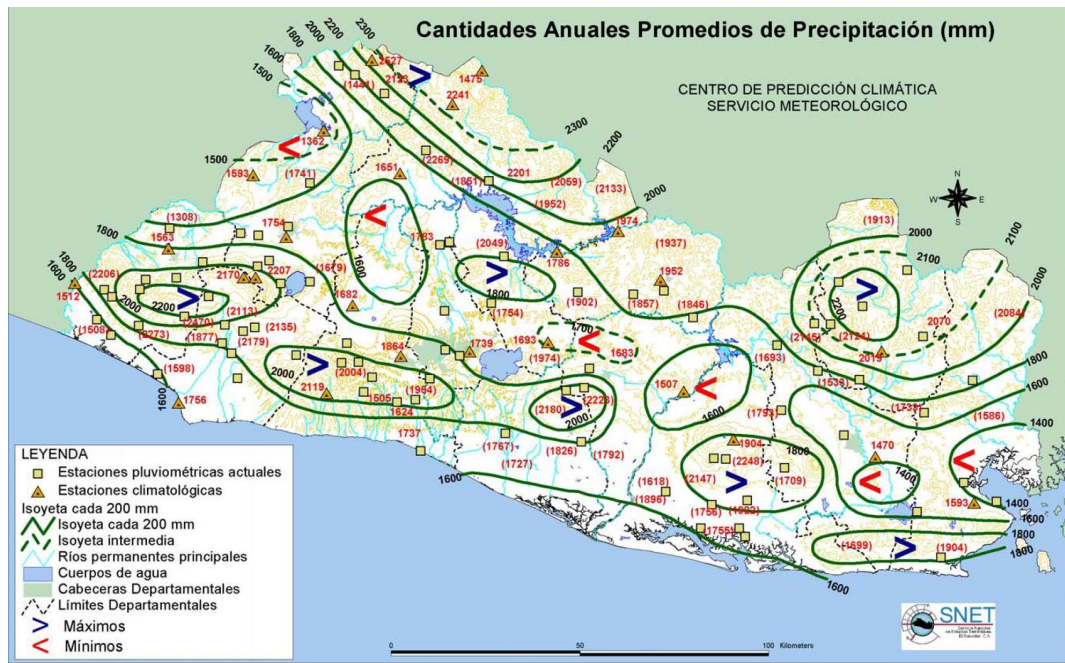


Figura 1.10. Precipitación media anual para la climatología.<sup>9</sup>

La temperatura del mar frente al litoral de El Salvador es de alrededor de 28°C y sus efectos se sienten varios kilómetros tierra adentro. En términos climáticos, las temperaturas de superficie del mar, mayores a 28°C favorecen el desarrollo de nubes convectivas y precipitaciones. El resultado de los factores anteriores determina las características de la temporada de lluvias en la zona de análisis (Jujutla).

De acuerdo a los registros históricos del Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos (PLAMDARH, 1981), la precipitación describe el siguiente comportamiento:

<sup>9</sup> Tomado de fuente de consulta 7.

Zona de máxima precipitación, área localizada entre Jujutla, San Pedro Puxtla, San José, El Naranjo. El efecto convectivo de los vientos marinos, al chocar con las elevaciones de las montañas induce la condensación rápida del aire caliente.

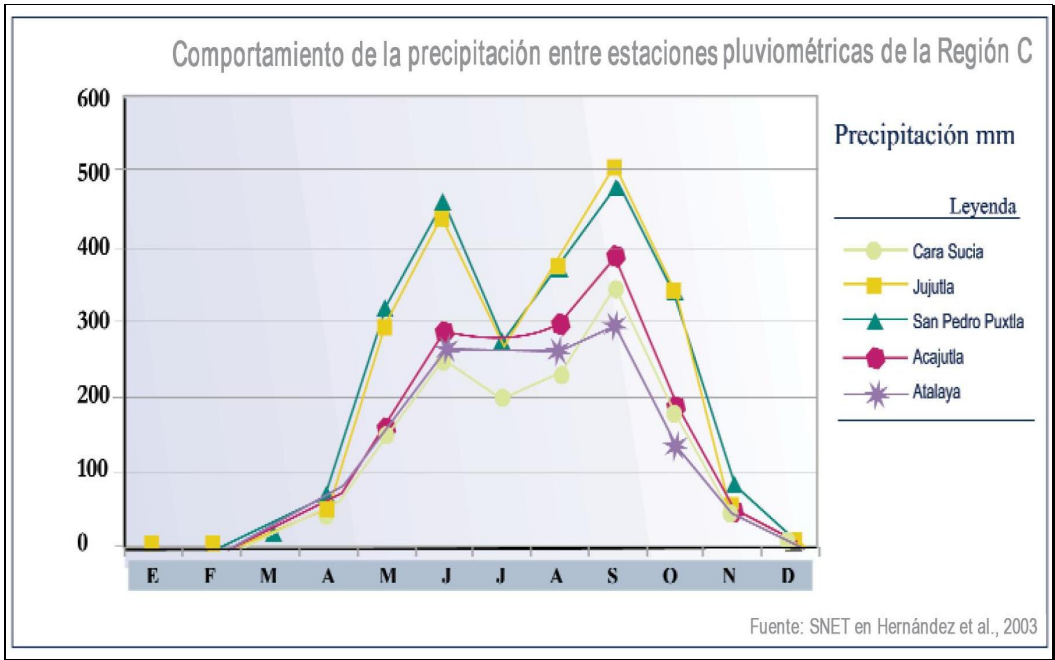


Figura 1.11. Precipitación en la región C, incluida Jujutla.<sup>10</sup>

Según el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET, 2004), el patrón climatológico para el departamento de Ahuachapán indica dos máximos (bimodal) de precipitación para los meses entre mayo-junio y septiembre-octubre [2].

<sup>10</sup> Tomado de fuente de consulta 2, página 32

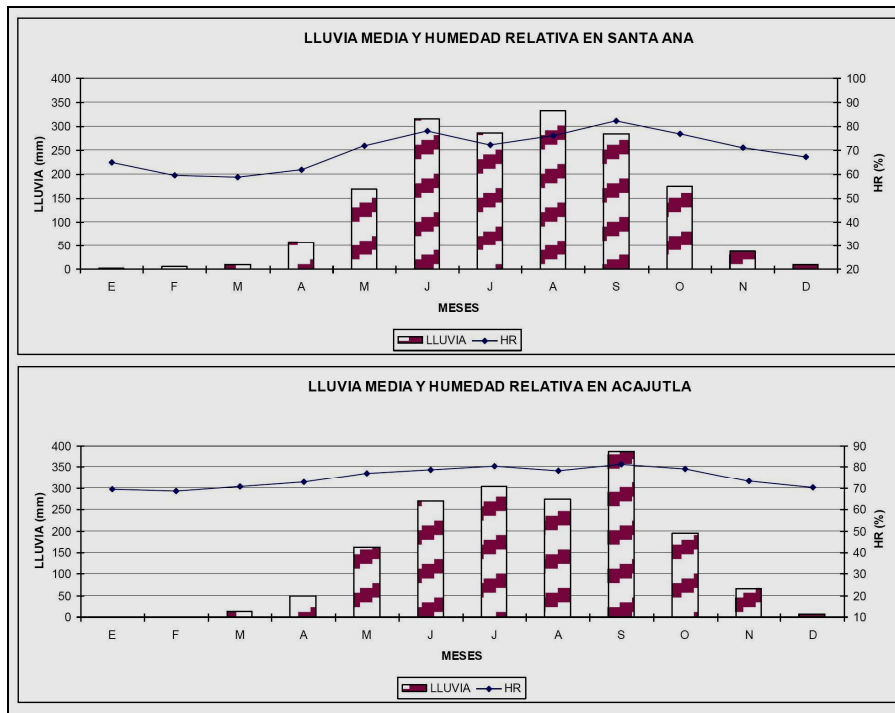


Figura 1.12. Precipitación media anual, en Acajutla y Santa Ana.

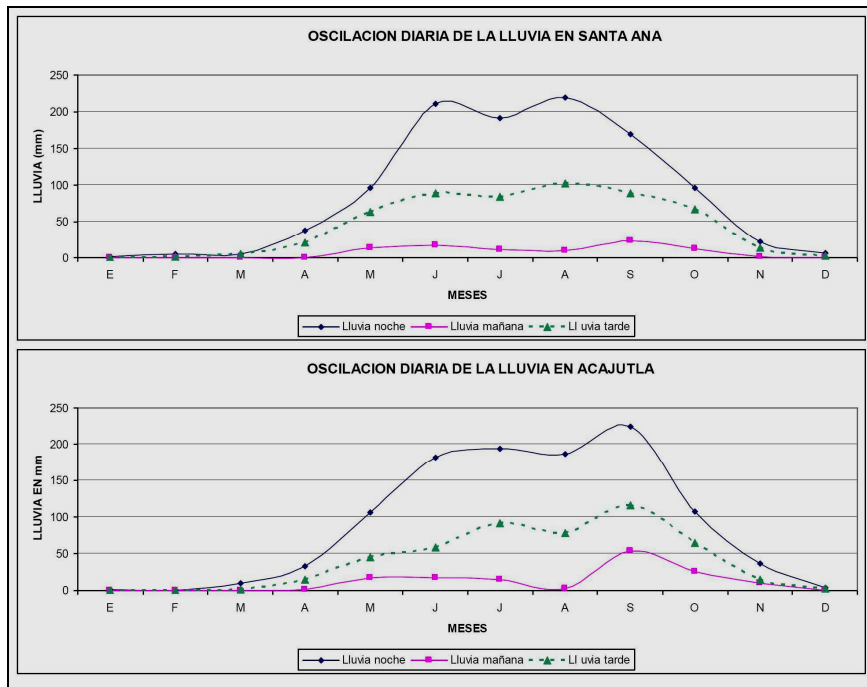


Figura 1.13. Oscilación diaria de la lluvia, en Acajutla y Santa Ana.

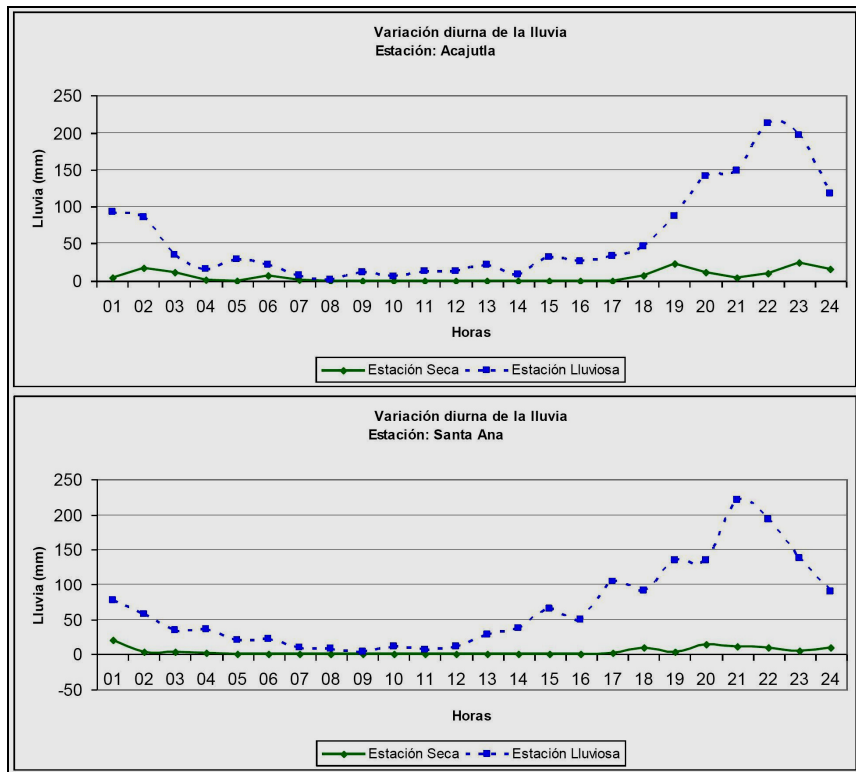


Figura 1.14. Variación diaria de la lluvia, en Acajutla y Santa Ana.<sup>11</sup>

## 1.6 Vientos

La causa de los movimientos horizontales y verticales del aire, así como el traslado de masas de aire y la ocurrencia de nubes, precipitaciones, tormentas o dispersión de contaminantes, tienen su origen esencialmente en los contrastes de presión atmosférica. Si en un área la presión es baja, el aire se dirige hacia allí de todas las direcciones, mientras que si es alta se aleja del centro de este punto.

El viento se genera por el calentamiento desigual de la superficie de la tierra realizado por el Sol. La temperatura generalmente disminuye con la altura y el aire tiene un cierto contenido de calor y humedad. Al estar en continuo movimiento produce los cambios en las condiciones del tiempo.

<sup>11</sup> Figuras 1.12 – 1.14, Tomado de anexos. Fuente de consulta 16.

En la zona (Jujutla), afectan, los vientos de carácter local, originados por diferencias de temperatura a escala menor: las brisas mar-tierra y las brisas montaña-valles y los Vientos Nortes.

Las brisas mar-tierra poseen dos direcciones, la primera se produce en sentido mar-tierra durante el día, debido al gran calentamiento que se opera en la superficie terrestre, que provoca una zona de menor presión. Mientras, sobre la superficie del océano Pacífico, que se encuentra más fría, se genera una zona de mayor presión, lo que provoca que el aire circule en sentido océano-tierra. Por la noche se produce el fenómeno contrario, debido a la rápida pérdida de calor del continente, y el mayor calentamiento de la masa de agua del océano.

También debido a la utilización del suelo de la zona por cafetales, los vientos montaña-valle, poseen dos direcciones, durante el día las zonas más altas se calientan más rápidamente que los valles y mesetas, por lo que se generan vientos locales que soplan desde los valles y mesetas hacia la zona. Cuando llega la noche en la zona de análisis, se enfría rápidamente debido a la cercanía de la costa, mientras que las zonas bajas (valles y mesetas) pierden lentamente el calor acumulado durante el día, por lo que las brisas soplan desde las zonas montañosas hacia los fondos cercanos a la costa (acajutla y bocana de San Juan entre varios).

Los vientos Norte, estadísticamente ocurren durante el mes de octubre, ocasionados por la alta presión, procedente de América del Norte, presentándose con intensidades y características de débiles a moderadas (de 10 a 30 km/h). Durante los meses de noviembre y diciembre, siempre se manifiestan alcanzando intensidades máximas durante noviembre. Dichos sistemas de alta presión anulan la actividad lluviosa ya que se oponen al desplazamiento de las Ondas del Este, secando el aire e impidiendo los procesos de condensación de vapor de agua y formación de nubes. Durante la estación seca las masas de aire de esos sistemas, acompañados de frentes fríos incursionan hacia Centro América provocando los "Nortes" que alcanzan

velocidades máximas de 15 a 20 metros por segundo, y a veces pueden prolongarse durante varios días.

Para la estación seca tenemos rumbos dominantes del noreste, este-noreste, norte-sur, norte, oeste y Para la estación lluviosa tenemos rumbos dominantes del este-noreste, suroeste, sur, sur, oeste-suroeste para Acajutla y Santa Ana respectivamente.

La distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro del globo, dependiendo de las condiciones climáticas locales, del paisaje y de su superficie. Según los resultados del estudio proyecto SWERA-UCA, las velocidades instantáneas máximas (ráfagas) registradas en las estaciones meteorológicas del país están en el rango de 4.5 a 7.8 m/s (medidos a 10 m de altura). En general las velocidades de vientos promedios anuales registrados por el proyecto oscilan entre 1.12 a 3.91 m/s (1 nudo=0,514 m/s), lo que equivale a vientos entre ligeros y moderados<sup>12</sup>.

Tabla 1.4. Masas de aire más frecuentes sobre la zona.

Tipo de Masa de aire	Fenómeno Atmosférico
Ártica (seca)	Ausencia de nubes bajas o medias, visibilidad extraordinaria, vientos del norte durante todo el día y temperaturas reducidas
Polar	Durante cortos lapsos de tiempo, formación de nubes bajas, buena visibilidad, viento del norte debilitándose por la tarde
Indiferente	Nubes bajas por la tarde, visibilidad reducida, viento débil del norte por la mañana, ráfagas del sur por la tarde, calma en la noche
Ecuatorial (sofocante)	Grandes acumulaciones de nubes bajas, principalmente a mediodía y después de la puesta del sol, visibilidad reducida, viento rafagoso del sur por la tarde y calmas frecuentes.
Aire del Caribe (alisios)	Visibilidad extraordinaria, poca nubosidad aumentando por la tarde o por la noche, con fuertes tormentas eléctricas
Local (calmas ecuatoriales)	Visibilidad reducida, con lluvia y viento variable, generalmente débil
Pacífico (monzón)	Visibilidad reducida durante todo el día, lluvias y viento fuerte pero sin ráfagas, generalmente del Este.

<sup>12</sup> Tomado de fuente de consulta 3.

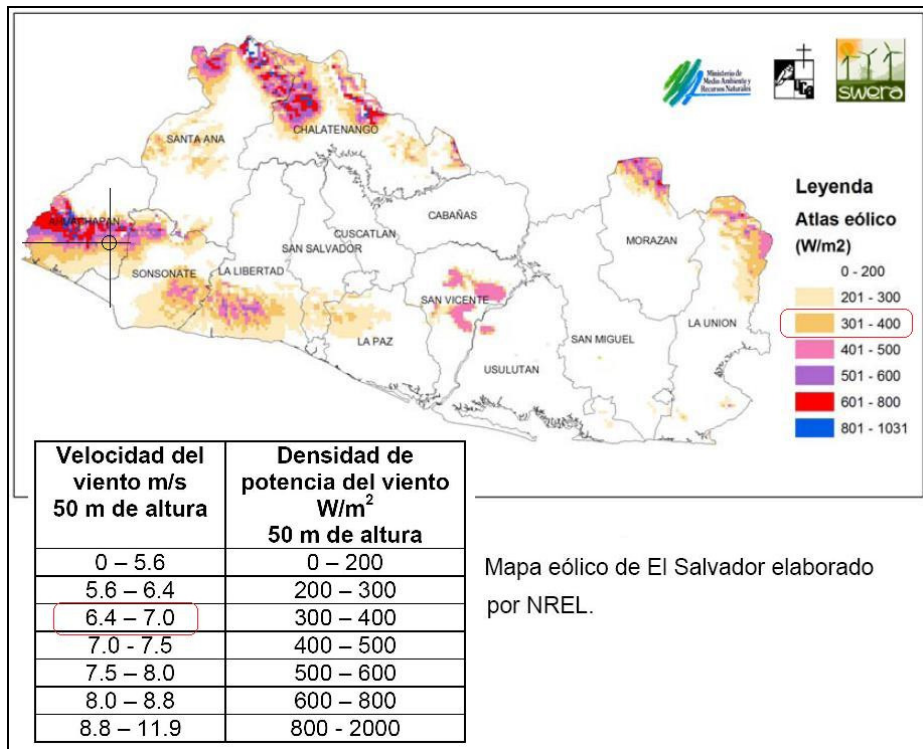


Figura 1.15. Disponibilidad de potencia eólica en la zona de Jujutla (enmarcado según el color). Los valores indicados de potencia definen las velocidades del viento a una altura de 50 m sobre el nivel superficial del río. [3]

En la figura 1.15, se puede leer que para la zona de interés, la velocidad promedio anual a una altura de 50 metros es entre 6.4 a 7 m/s; que considera los parámetros: factor de escala y factor de forma (Distribución de Weibull), la rugosidad del lugar (0.24 para plantaciones de café y bosques naturales) y la Temporada: seca, seca lluviosa, lluviosa y lluviosa seca; limitan la velocidad del viento (que varía con la altura) sobre la superficie del agua del río copinula a:

$$V_{\text{Río Copinula}} = \left\{ 2.5 u^* \left[ \ln \left( \frac{z_{\text{sup. del río}}}{z_0} \right) + \psi \right] \right\} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$u^* = \frac{V_{\text{Ref}}}{2.5 \ln \left( \frac{z_{\text{Ref}}}{z_0} \right)} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Ecuación 1.2

Donde:  $V_{\text{Río Copinula}}$  es la velocidad a una Z (altura desde el nivel del agua en el cauce del río).

- $Z$  es la altura a la cual se verifica la velocidad del viento sobre el cauce del río, para el análisis será a una altura de 1 m sobre el nivel del agua;
- $Z_0$  es la rugosidad del terreno = (rugosidad de Nikuradse en diagrama de Moody)/30 = 0.24 (plantación de café)<sup>13</sup>;
- $Z_{ref}$  altura de referencia, que para el caso en la figura 1.15, el valor es de 50 m de altura de la torre donde se tomaron los datos de velocidad del anemómetro.
- $z_0$  es,  $u^*$  es la velocidad de fricción turbulenta que es proporcional a la desviación típica de las oscilaciones turbulentas alrededor del valor medio (10 minutos);
- $\Psi$  función de la estabilidad atmosférica (cero en atmósferas neutras, tal es el caso para la zona de análisis).

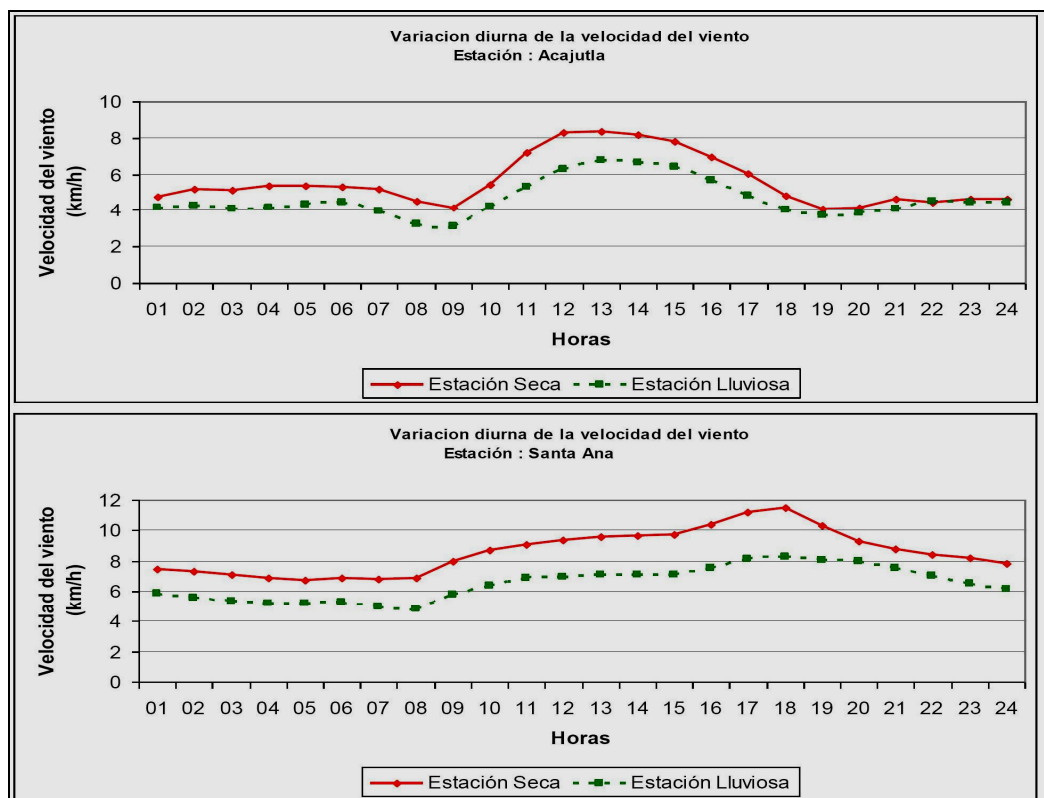


Figura 1.16. Variación diaria de la velocidad del viento, en Acajutla y Santa Ana.

Evaluando para los promedios de velocidad máximo y mínimo (ver tabla

<sup>13</sup> Tomado de fuente de consulta 3.

en figura 1.15.):

$$u^* = \frac{6.4}{2.5 \ln\left(\frac{50}{0.24}\right)} = 0.48 \text{ m/s}; \left(V_{\text{Río Copinula}}\right)_{\min} = \left\{2.5(0.48) \left[\ln\left(\frac{1}{0.24}\right)\right]\right\} = 1.71 \text{ m/s}$$

$$u^* = \frac{7}{2.5 \ln\left(\frac{50}{0.24}\right)} = 0.524 \text{ m/s}; \left(V_{\text{Río Copinula}}\right)_{\max} = \left\{2.5(0.524) \left[\ln\left(\frac{1}{0.24}\right)\right]\right\} = 1.9 \text{ m/s}$$

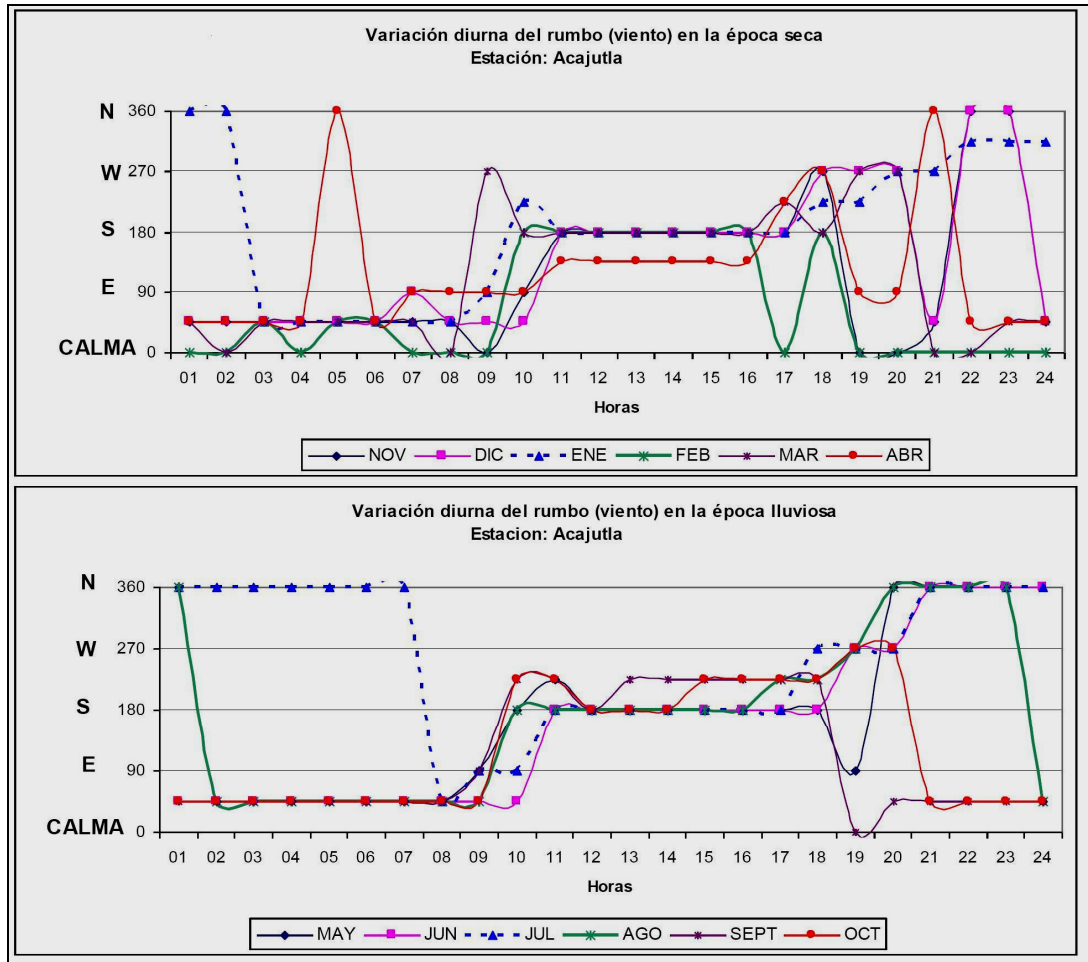


Figura 1.17. Variación diaria del rumbo del viento, en Acajutla.<sup>14</sup>

Para la zona costera predomina el flujo de viento del sur y del este en todo el año, con velocidades menores por la noche y mayores por las tardes.

<sup>14</sup> Figuras 1.16 – 1.17, Tomado de anexos. Fuente de consulta 16.

## 1.7 Humedad relativa

Con respecto a humedad relativa de la zona, se observa que la humedad relativa tiende a incrementarse en los meses de la estación lluviosa (>80 %) y a disminuir en la estación seca, con porcentajes menores de 65 %.

La variación de la humedad relativa durante el día presenta en su distribución, los mínimos en las horas de mayor calentamiento entre las doce y las catorce horas en todos los meses del año, con promedios por debajo de 45 % para los meses de la época seca, tal comportamiento se origina por la mañana cuando la brisa de tierra desplaza el aire desde la tierra hacia el océano y durante la época lluviosa también hay un ascenso del aire que deja la superficie de la tierra sin humedad alrededor del mediodía. [16]

Lo contrario sucede con los valores máximos de humedad que se presentan a partir de la media noche hasta el amanecer sobrepasando el 80 %, relacionado con la concentración de humedad en la superficie luego de que en horas de la tarde la brisa marina transporta humedad de la costa pacífica agregando el flujo horizontal proveniente desde El Caribe, de igual forma la lluvias de preferencia en la noche o madrugada saturan el aire de humedad. Acajutla muestra una variación menor de 12 %, debido a que la estación se ubica enfrente del mar.

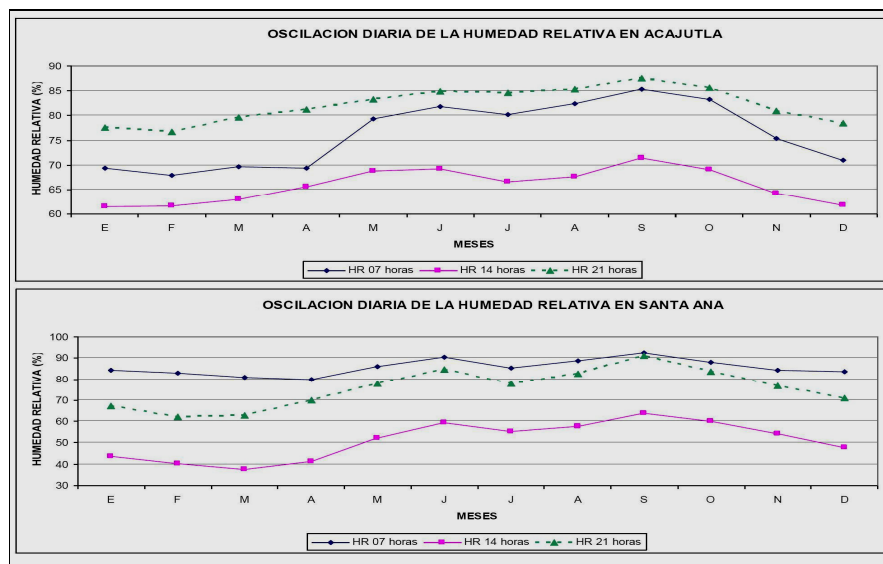


Figura 1.18. Oscilación diaria, de la humedad relativa cercana a Jujutla.

## 1.8 Presión atmosférica.

La presión atmosférica media es igual a 1013 mb, valor que define la alta presión (anticiclón) y la baja presión (borrasca o ciclón). La presión atmosférica muestra una tendencia a disminuir a partir de mayo hasta octubre, con aumentos significativos en julio y/o agosto debido a la influencia de altas presiones migratorias que son causantes del período canicular.

Existe una clara disminución de la presión atmosférica en la zona durante la estación lluviosa. Todo lo contrario sucede durante la estación seca donde la presión se mantiene alta originada por las masas de aire de sistemas de alta presión que se ubican sobre el país. [16]

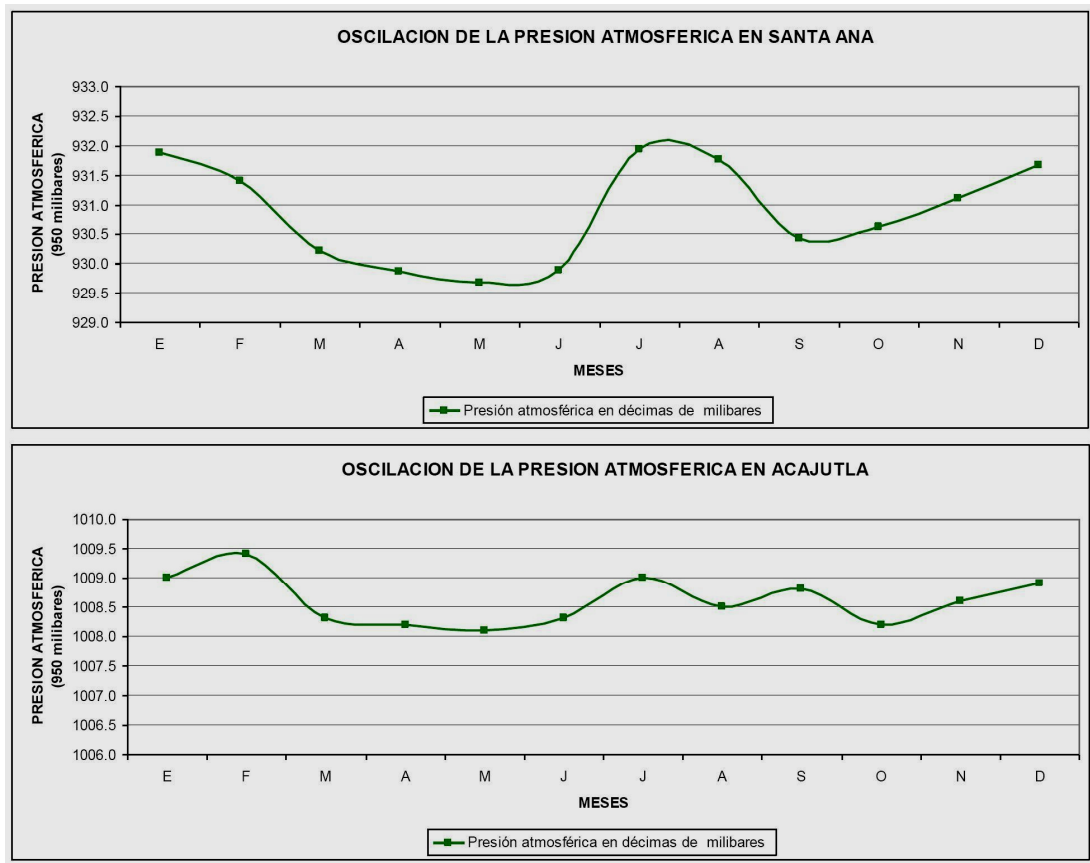


Figura 1.19. Oscilación anual de la presión atmosférica, en Acajutla y Santa Ana.[16]

En el mes de mayo se presentan los valores de presión atmosférica más bajos (1008.1 y 929.7 mb) asociados a sistemas de bajas presiones y al acercamiento la de la Zona de Convergencia intertropical (ZCIT), mientras que en enero y en julio se registran los valores más altos para la zona costera occidental (931.9 mb).

La oscilación de la presión atmosférica durante el día presenta valores de menor presión atmosférica durante la tarde y la noche que por la mañana, esto se relaciona con el fenómeno conocido como marea barométrica. A continuación algunos gráficos de mediciones cercanos a la zona.

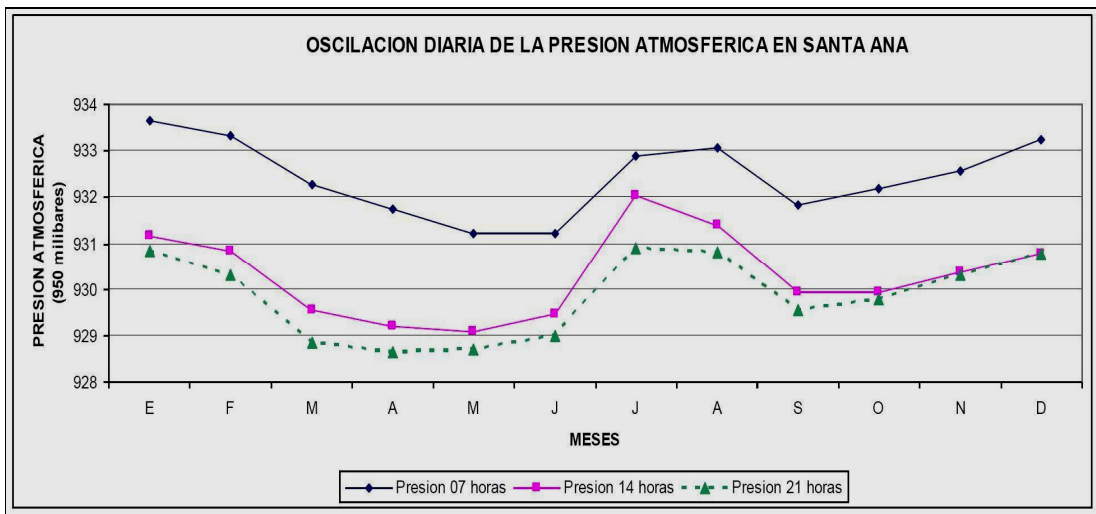


Figura 1.20. Oscilación diaria de la presión atmosférica en Santa Ana, recordando que en la costa, Acajutla no hay variación. [16]

### 1.9 La Radiación, Luz Solar (brillo: horas de luz solar) y Nubosidad.

La Tierra gira alrededor del Sol en una órbita elíptica a una velocidad media de 30 km/s y al mismo tiempo rota sobre su eje a una velocidad de 0.5 km/s. El eje de rotación de la Tierra está inclinado 23.45° con respecto a su órbita alrededor del Sol. La distribución de la radiación solar sobre la superficie de la Tierra y su variación a lo largo de la duración del día es el resultado de la posición inclinada de la Tierra, su rotación diaria y su traslación anual. La radiación solar recibida en la superficie de la Tierra no es constante y para su

medición es necesario conocer los ángulos entre el Sol y la Tierra.

La posición de una localidad, en este caso Jujutla en la superficie de la Tierra se conoce a través de las coordenadas de latitud y longitud (13°47'42.82"N, 89°50'52.29"O). La posición del sol en el cielo se conoce por los ángulos horarios (desplazamiento del sol Este u Oeste del meridiano: 4 minutos por meridiano o longitud o un barrido angular de 15° por hora) y la declinación (ángulo formado por la línea que se extiende desde el centro del sol al centro de la tierra y la proyección de esta línea en el plano ecuatorial de la tierra, el cual varía entre 23.45° a -23.45°).

**Tabla 1.5.** Duración astronómica del día (en horas).

Latitud	Longitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Nombre
13.94	-89.86	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2	Ahuachapán
13.88	-89.64	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2	Los Andes
13.83	-89.62	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2	Cerro Verde
13.57	-89.83	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2	Acajutla

En la tabla 1.5 [3], se presenta la duración del día (con brillo solar) para algunas localidades cercanas a Jujutla. Se muestra que todos los datos son idénticos, implica que ese valor en horas se cumple para la localidad en Jujutla.

La luz solar está asociada con la nubosidad cuando la nubosidad es escasa, aumenta la luz solar y lo contrario es cuando aparecen nubes en el cielo, la cantidad de luz solar es menor. En los meses de la época seca hay un aumento en la cantidad de horas de luz solar, con cielos despejados, alta radiación solar y vientos fríos y secos, al contrario de la época lluviosa en que la nubosidad aumenta, ocasionando lluvias moderadas y las horas de luz solar disminuyen. En el mes de marzo podemos observar más horas de luz solar y menos nubosidad, contrario a septiembre y junio donde hay más nubosidad y menos luz solar, esto coincide con la presencia de sistemas de bajas presiones.

La nubosidad va aumentando en el año, tendiendo a disminuir cuando comienza la estación seca y a aumentar en la estación lluviosa, el mes con mayor nubosidad es septiembre alcanzando entre ocho y nueve decimos de la bóveda celeste cubierta de nubes, las horas de la noche son las que presentan

mayor cantidad de nubes durante el período de lluvias, al contrario de la estación seca en que las horas de la tarde son las de mayor nubosidad aunque cubriendo la bóveda celeste en menos de 4 décimas.

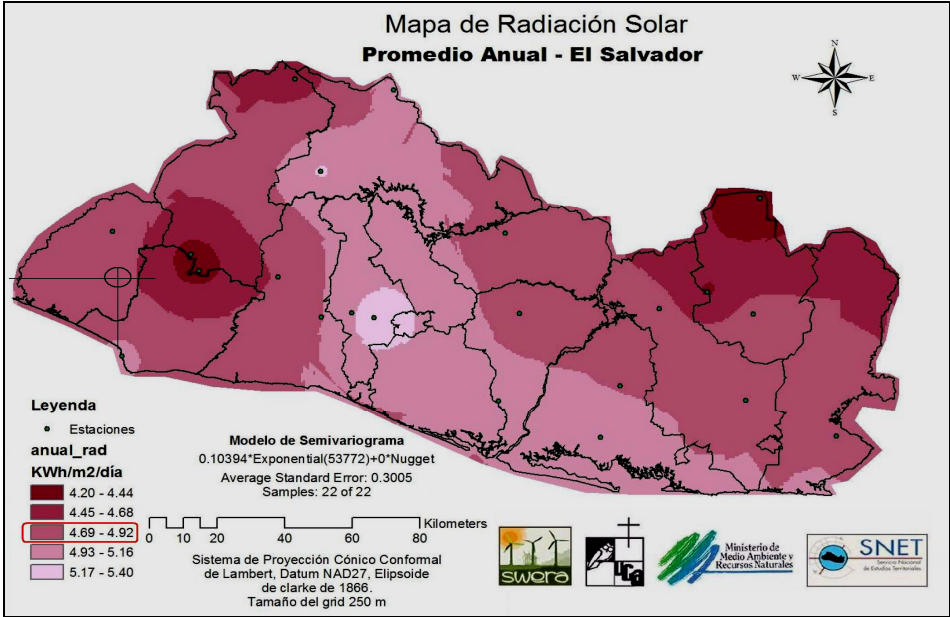


Figura 1.21. Mapa de radiación (promedio anual) en KWh/m<sup>2</sup>/día para El Salvador. Interpolación de Kriging. En Jujutla se tiene un valor promedio anual entre 4.69 – 4.92. [3]

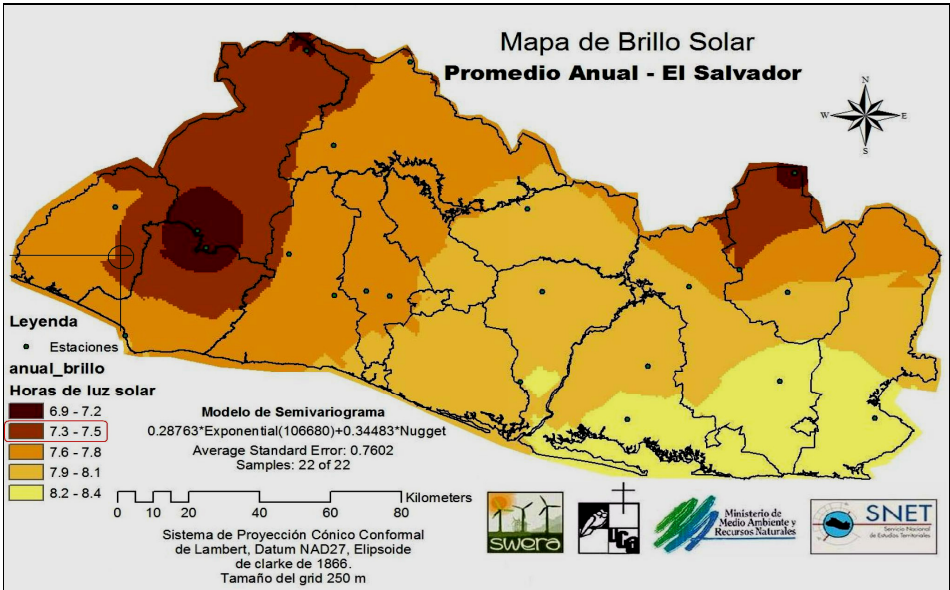


Figura 1.22. Mapa de brillo solar (en horas de luz solar) para El Salvador. Interpolación de Kriging. [3]

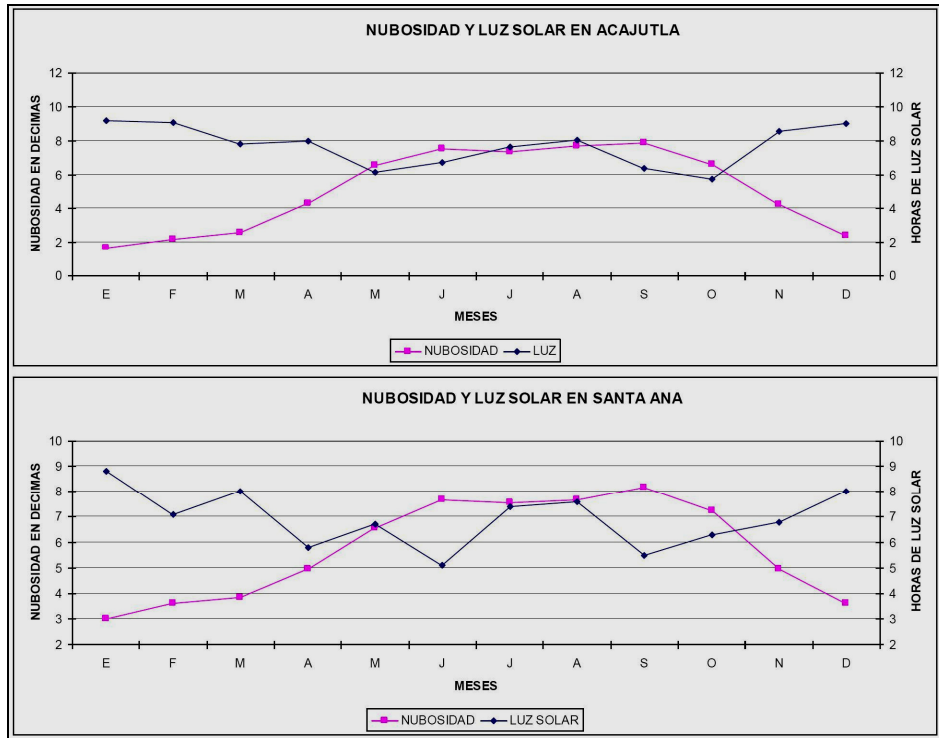


Figura 1.23. Nubosidad y luz solar en Acajutla y Santa Ana. [16]

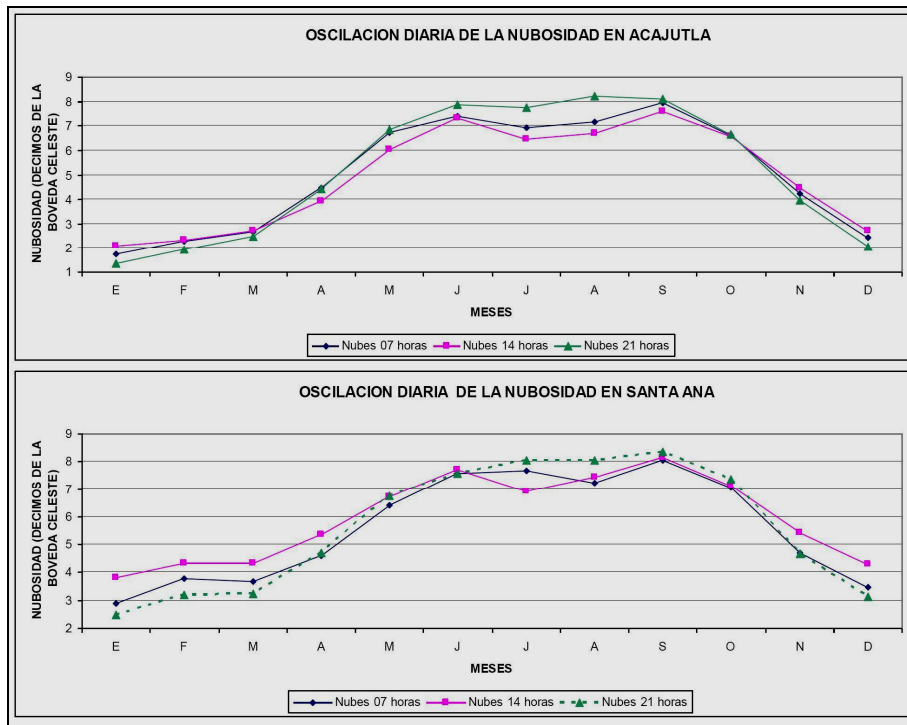


Figura 1.24. Oscilación diaria de la Nubosidad en Acajutla y Santa Ana. [16]

### 1.10 El relieve (orografía de la zona).

En el país, alrededor del 13 % del total del territorio, está conformado por planicies costeras, el 49% por áreas montañosas, y el 38 % consiste en zonas de relieve bajos, pequeñas lomas y valles.

En la figura 1.25, se muestra con relieve y sus respectivas curvas de nivel el detalle de la zona de análisis, el área es parte del 49 % de la montaña, que pertenece a los estratos del Bálsamo y está sembrada de cafetales con sombra, en las laderas más inclinadas se ha sembrado tempate con algunos árboles y malezas propios de la zona. Las curvas de nivel que aparecen en el mapa son desde 600 a 700 msnm, en el lugar de las cascadas. Siempre en la misma figura, los 2 círculos definidos con líneas punteadas indica zona de calderas y los 2 puntos marcados de rojo muestran el lugar de ubicación de las caídas. Ver anexo 1.1, para más detalle o descargar el estudio que realizó ANDA sobre Mapa Hidrogeológico Nacional en página web, cuyo link es

[http://www.anda.gob.sv/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&id=11:p&Itemid=115](http://www.anda.gob.sv/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=11:p&Itemid=115).

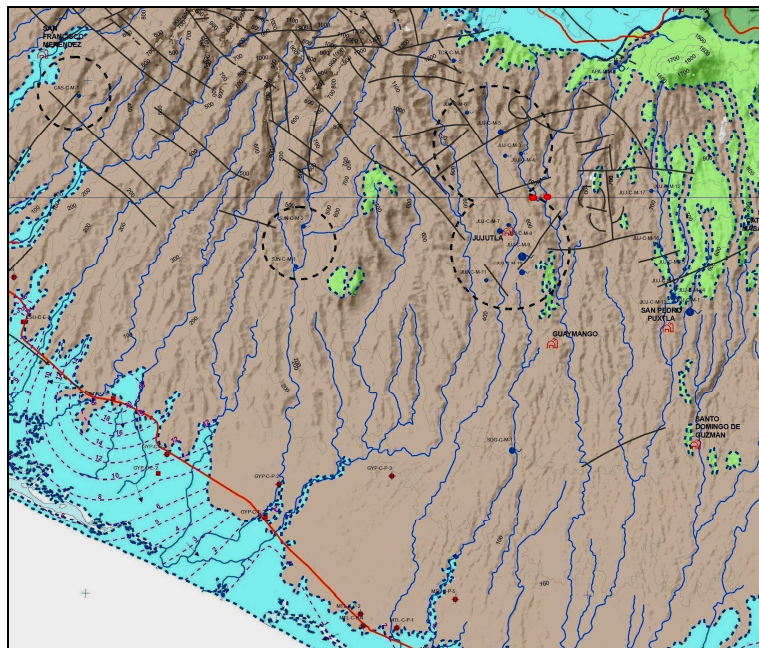


Figura 1.25. Relieve de la zona. El color en el suelo denota la permeabilidad del substrato. [9]

La cuenca media se localiza entre la elevación 340 msnm y la carretera litoral (CA-2), es la que prácticamente define la elevación media de la región.

Interesa entonces analizar la cadena costera de volcanes, específicamente la sierra del Bálsamo, pues es donde se ubica la zona del recurso hídrico. La cadena costera está compuesta por: Sierra de Tacuba, Sierra el Bálsamo y Sierra de Jucuarán.

**Sobre la Sierra del Bálsamo**, ésta se ubica en los departamentos de Ahuachapán, Sonsonate, La Libertad, San Salvador y La Paz. Presenta su máxima altura de 1,123 m.s.n.m cerca de loma larga en el Municipio de San Marcos.

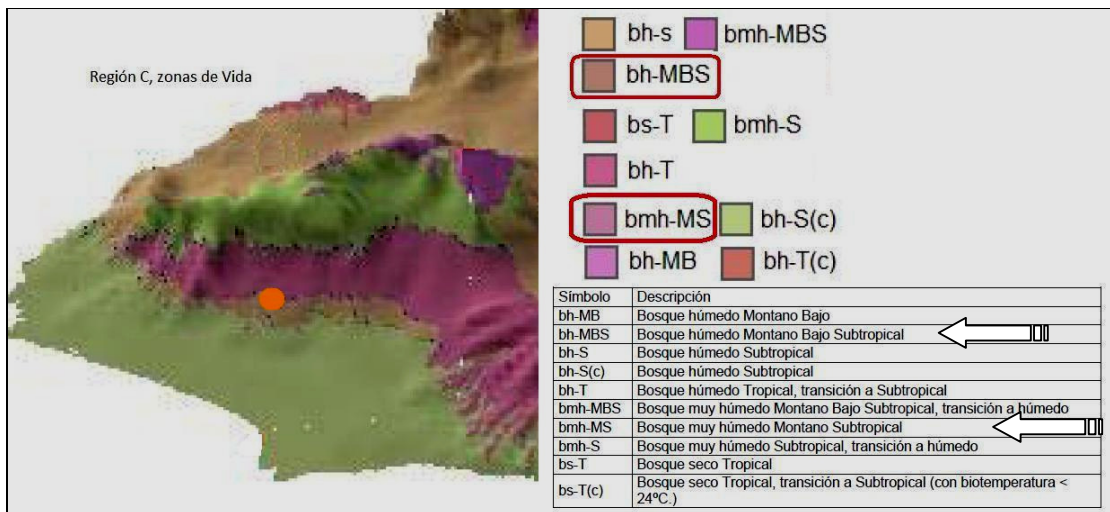


Figura 1.26. Muestra el relieve de la zona, a una altura sobre el nivel del mar entre 600 y 700 m. [3]

Uno de los criterios de clasificar los suelos es el basado en las características físicas y químicas, algunas de las características de los diferentes órdenes de suelos se presentan a continuación:

Según el mapa petrologico (ver figura 1.27), en el lugar de análisis el suelo es catalogado como latizol arcilloso rojo, andisoles y litosoles, (Alfisolos e inceptisoles).

**Alfisoles:** Suelos minerales maduros, bien desarrollados, con un horizonte superficial de color oscuro (epipedón úmbrico) y un subsuelo de acumulación de arcilla aluvial (horizonte argílico); El Orden de los Alfisoles se caracteriza por presentar un horizonte subsuperficial de enriquecimiento secundario de arcillas desarrollado en condiciones de acidez o de alcalinidad sódica, y asociado con un horizonte superficial claro, generalmente pobre en materia orgánica o de poco espesor. [13]

Tabla 1.6. Unidad estratigráfica de la zona en Jujutla, finca copinula. [13]

EDAD	UNIDAD ESTRATIGRAFICA	OBSERVACIONES
PLIOCENO	ESTRATOS DE BALSAMO	<p>Productos volcánicos; prevalencia de aglomerados (lahars?); intercalaciones de tobas volcánicas endurecidas y corrientes de lavas basáltico-andesítica.</p> <p>El espesor alrededor de 500 m: En el E de El Salvador solamente restos rudimentarios de esta serie. Suelos fósiles. Suelo rojo de gran profundidad (hasta 20 m) (según tipología de KUBIENA: ROTLEHM). Cubiertas de rocas extrusivas, con pocas intercalaciones de tobas volcánicas y aglomerados. Cubiertas en la parte inferior de carácter andesítico, en la parte superior de carácter basáltico.</p> <p>Protrusiones más ácidas (hasta carácter riolítico) sobre todo en el Este de El Salvador. Espesor probablemente mayor de 1000 m.</p>

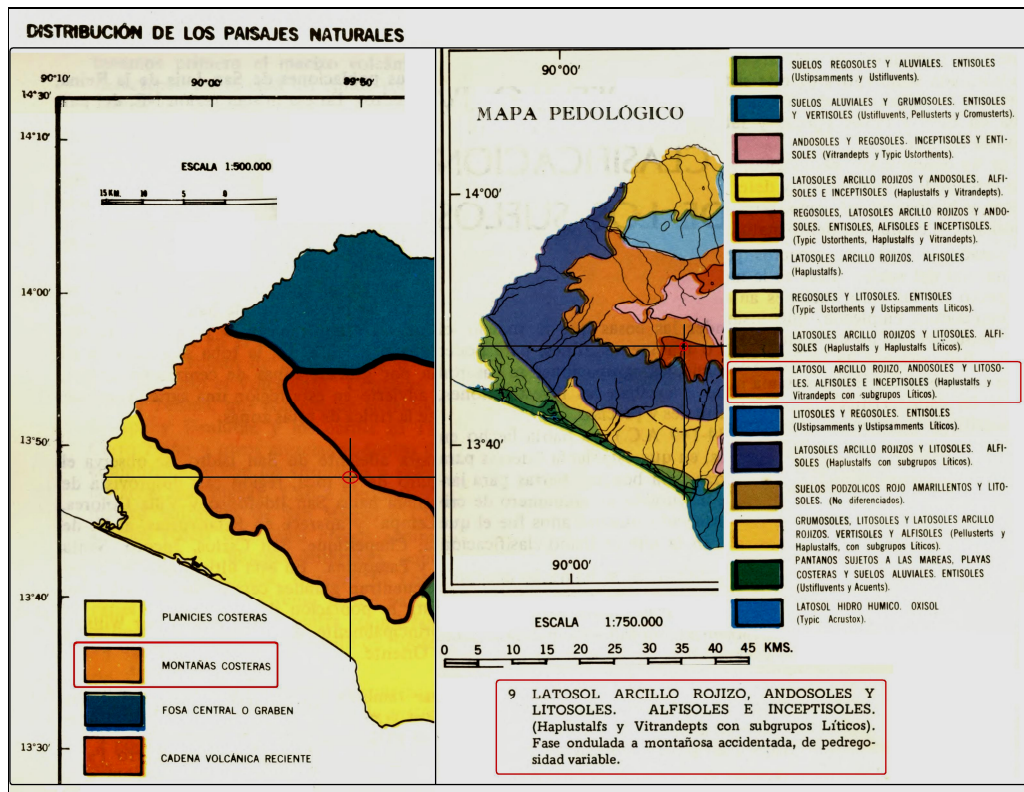


Figura 1.27. Mapa pedológico en la ubicación del lugar de las caídas de agua. [13]

***Inceptisoles:*** Son suelos minerales de desarrollo incipiente, con débil desarrollo de horizontes. Muestran horizontes alterados que han sufrido pérdida de bases, hierro y aluminio pero conservan considerables reservas de minerales meteorizables. Son desarrollados de sedimentos aluviales, fluviales, coluviales, de cenizas volcánicas, de rocas básicas y ácidas. [3]

La parte de la llanura costera que ocupa la zona es angosta y está limitada en su porción norte por las elevaciones de la cadena costera, que en esta parte son muy bajas. La llanura presenta pendiente hacia el mar y en su borde superior, la llanura se torna en una superficie con pendientes formadas por la acción erosiva, cuyas rocas volcánicas antiguas son cortadas por numerosas corrientes de agua paralelas que drenan hacia el mar.

Entre algunas características de la Región C se tienen: pendiente media del terreno de 20%; elevación media de 335.4 msnm, perímetro 82 Km; y ríos de tercer orden con una pendiente media de 7.5% (PRISMA, 1981).

La mayor parte de la Región C (77%) está cubierta por rocas de origen volcánico, edad cuaternaria a terciaria (pliocénico), su carácter petrográfico va de básico a ácido, predominando los materiales básicos, éstos, en su mayoría, han sido eyectados por fisuras y grietas. Posteriormente, los materiales volcánicos de las partes altas han sido erosionados por las corrientes de las aguas, y se han transportado y depositado en las partes bajas, coeficiente de robustez, 0.666 y coeficiente de relieve, 0.0882 (PRISMA, 1981). [1]

### **1.11 Hidrología del lugar. Recursos Superficiales.**

Los principales recursos hídricos responden a la dinámica del ciclo hidrológico de la zona, el cual se caracteriza por una precipitación anual promedio de 1900 mm, que alimenta tanto a nivel superficial como subterráneo. La precipitación pluvial se considera la principal fuente de agua con que cuenta el país y la zona de análisis. Ver anexos.

Un Balance Hídrico Integrado, involucra aspectos tanto de cantidad y calidad de agua superficial y subterránea, así como de la demanda por parte de

los sectores de usuarios del recurso, involucrando las restricciones por calidad para establecer la condición actual de disponibilidad de agua. Para el caso de la subcuenca San Pedro, se hará un balance de cantidad y no de calidad, debido al interés que se tiene.

Las cuencas de la región C, son: Cara Sucia, Cuiliapa, Bocana de San Juan, Cauta y San Pedro. En tablas 1.7, 1.8 y 1.9, aparecen datos de los ríos vinculados a las cuencas cercanas a la cuenca San Pedro. [1, 2, 4]

El agua que escurre superficialmente corre hacia el río y finalmente al mar. Una parte mínima (por el tipo de suelo existente) del agua que se infiltra es retenida por el suelo, cuya capacidad de retención depende de su textura y estructura (porosidad); otra parte del agua infiltrada se convierte también en escorrentía superficial al ser saturada la capacidad de almacenamiento suelo; otra parte se convierte en flujo subsuperficial, y por último otra parte percola (almacenamiento de agua subterránea), hacia capas inferiores produciendo la recarga de aguas subterráneas. El agua que se infiltra, viaja lentamente y llega a alimentar al río, y finalmente desagua al mar.

**Tabla 1.7 Ríos de la Región C y cuencas a las que pertenecen**

Río	Cuenca
Río Moscua Río Metalío Río Cauta	Cauta (Área: 93.1 km <sup>2</sup> )
Río El Sunzacuapa <span style="border: 2px solid red; padding: 2px;">Río Copinula</span> Río San Pedro	San Pedro (Área: 216.3 km <sup>2</sup> )

Fuente: Sistema de Información Geográfica (SIG); MARN, 2004

Tabla 1.8 Descripción de ríos y drenajes principales de la Región C

Cuenca principal	Ríos/corrientes principales	Observaciones
Bocana de San Juan	Quebradas	Quebradas de invierno. Recoge derivación del río Rosario
	Cauta	Nace en zona de cafetales de Jujutla y desemboca en el manglar Metalío
	Metalío	Desemboca en el manglar Metalío
Cauta	Chalata	Desemboca en el manglar Metalío
	Moscua	Desemboca en el manglar Metalío
	Las Marías	Drenajes cortos
	Copinula	Nace en zona de cafetales de Jujutla Tributario de Sunzacuapa
San Pedro	Sucio, Sunzacuapa	Nace en zona de cafetales de Jujutla Desemboca en la bocana El Limón
	Sucio, San Pedro	Tributario de Sunzacuapa
	San Pedro, Santo Domingo	Bocana El Limón

Tabla 1.9 Área aproximada de las cuencas y drenajes de la Región C

Río/cuenca	Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	Longitud del cauce (km)	Numero de orden	Tipo de drenaje
Bocana de San Juan Costa Azul	2	40	1	Paralelo
Cauta	30	25	2	Paralelo
Metalío	24.8	16	2	Paralelo
Moscua	15	11	2	Dendrítico irregular
Sunza, Copinula	116.8*	24	4	Dendrítico irregular

\* Son cuencas principales de mayor área

Fuente: PLAMDARH, 1981



### 1.12 Recursos (Acuíferos) subterráneos.

El modelo conceptual de la Región C, establece que el agua lluvia se precipita en mayor cantidad en las montañas. El agua se infiltra por la cobertura vegetal existente (bosques, plantaciones de café y agrícolas).

Las formaciones de lavas y aglomerados cubren cerca del 70% de la Región C. Se encuentran cubiertos de materiales piroclásticos. La permeabilidad de estos materiales es de baja a nula, es mayor en las lavas fracturadas, lo cual origina bolsones de agua (acuíferos colgados) en la cuenca media.

La infiltración ocurre cuando en lavas fisuradas cerca de la superficie y en zonas de pendientes moderadas con capas delgadas de suelo (estratos de 2-3 m), constituida por partículas de arena, limo (material suelto) y arcilla. Estos suelos pueden permitir la percolación de agua hasta el horizonte inferior (final de la capa delgada) y dar lugar a la circulación y almacenamiento de agua a través de los planos de fracturas y diaclasas (columnas de rocas incrustadas verticalmente), donde se moviliza hasta que surge a la superficie en niveles inferiores. [4]



Figura 1.30. Mapa de región C, acuíferos subterráneos<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Tomado de pagina 16, fuente de consulta 4.

La zona de recarga está limitada por áreas de sedimentos aluvionales cuyos límites son: al Norte se encuentra en su mayor parte por toda la carretera litoral (CA-2); al Este limita con la cuenca del río San Pedro; al Oeste con la cuenca del río Paz y al Sur con el Océano Pacífico. En general, el agua se moviliza desde el Norte hacia el Sur. El agua subterránea está ubicada en la zona Sur de Ahuachapán en las planicies costeras, registros determinaron mediano peligro de salinización y bajo peligro de Sodio, además la disponibilidad general del agua subterránea determina que no es continua, está caracterizada de la siguiente manera: [2]

a) Agua dulce localmente abundante: moderadas a grandes cantidades de agua dulce de aluviones no consolidados. Niveles estáticos de agua a profundidades de 2 a 200 m.

b) Escasos a pequeños caudales de agua dulce o salina: provienen de aluviones no consolidados de la planicie costera.

c) Pequeñas a localmente moderadas cantidades de agua dulce.

Tabla 1.10 Disponibilidad de acuíferos subterráneos en la Región C. [2]

	Disponibilidad de acuíferos subterráneos	Profundidad del agua subterránea	Localización en la zona Sur de Ahuachapán
1	Escasa a pequeña cantidad de agua dulce o salina proveniente de aluviones no consolidados de la planicie costera del Océano Pacífico	Nd	Zona costera litoral de los municipios de San Francisco Menéndez, Jujutla y Acajutla
2	Pequeñas a moderada cantidad de agua dulce de lavas intemperizadas y piroclásticas compactas	Acuíferos generalmente no confinados, niveles estáticos de agua entre profundidades de 1-200 m	Zona costera municipios de Jujutla y Acajutla
3	Muy pequeñas a pequeñas cantidades de agua dulce de lava y piroclásticas compactadas generalmente no confinados	Niveles estáticos de agua profundidades entre 1-200 m	Área de San Francisco Menéndez, zona del área natural del Parque Nacional El Imposible Guaymango-Jujutla
4	Moderadas a grandes cantidades de agua de aluviones no consolidados. Acuíferos no confinados	Niveles estáticos de agua entre profundidades de 2-50 m	Áreas de cuenca del río Paz zona de Acajutla, Sonsonate

Fuente: MARN, 2002; mapa de recursos hídricos

Generalmente, las zonas de recarga de los acuíferos se encuentran en

los centros de erupción volcánica.

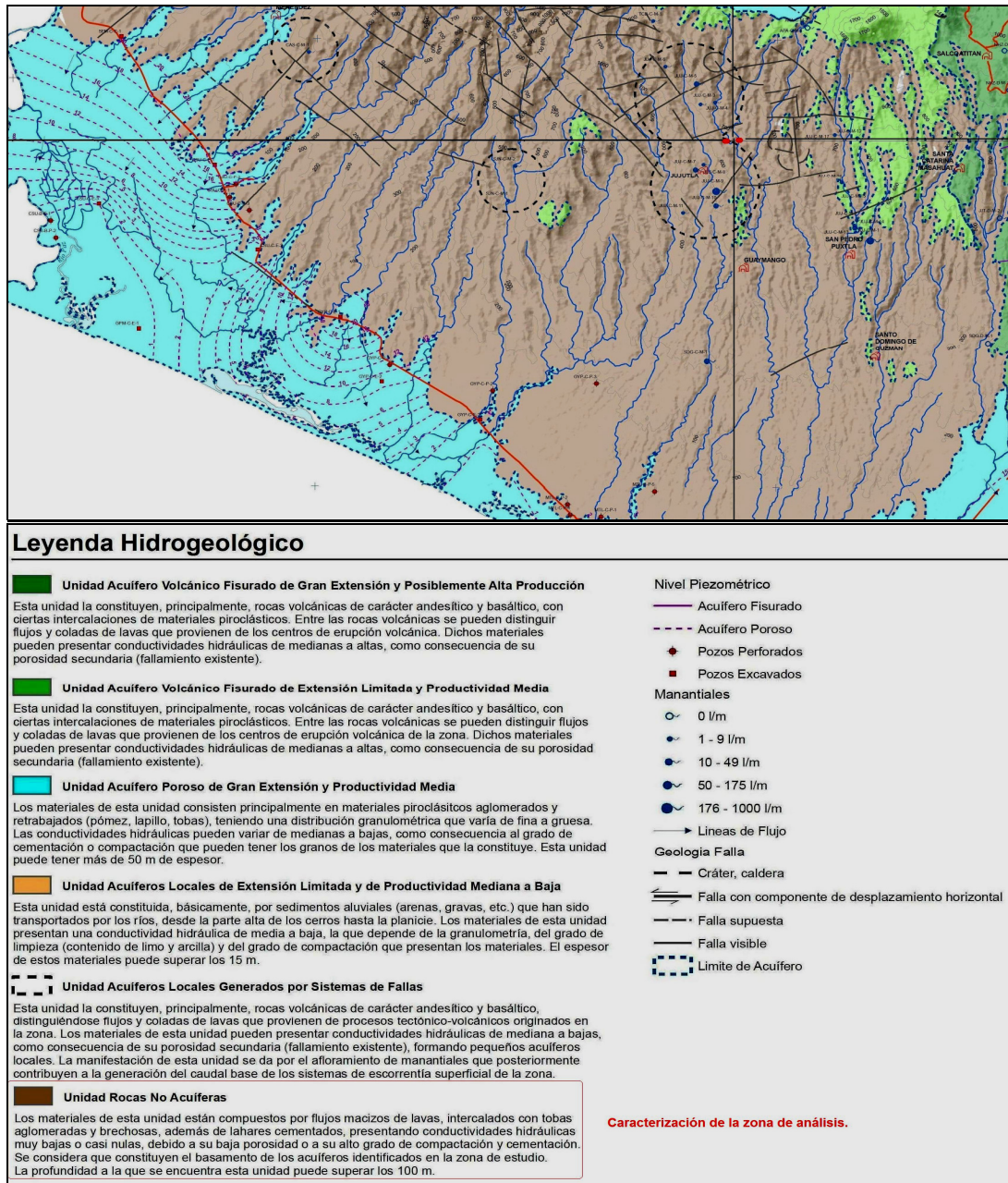


Figura 1.31. Mapa de mantos acuíferos de la zona, donde se define para los acuíferos subterráneos, una conductividad baja a nula, en el lugar de ubicación de las cascadas (Mapa repetido en figura 1.25).<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Tomado de mapa Hidrogeológico, ó fuente de consulta 9.

### 1.13 Drenaje.

El desagüe se divide en superficial y subterráneo, pues durante la seca, el agua proviene de la recarga subterránea (curva de tiempo seco). El drenaje de la Región C se efectúa por medio de una serie de ríos, los que en su mayoría nacen en las faldas de la Montaña de Tacuba. Ver figura 1.31.

A través del tiempo, el desagüe superficial del agua pluvial ha desarrollado una red de drenaje, así los ríos y en este caso el Copinula, sigue el buzamiento (orientación de la inclinación de los estratos) hacia el suroeste. Además, el drenaje característico, según la topografía, puede subdividirse en tres clases: de la cuenca alta, media y baja. La cuenca montañosa es de tipo dendrítico, los cauces son profundos, en forma de "V" (Ver figura 1.29), con una erosión retrocedente (destrucción en el sentido contrario a la corriente) y tienden a multiplicarse formando pequeñas subcuencas. [1]

Tabla 1.11 Extracción de agua del río copinula. [1]

Subcuenca	Fuentes (ríos)	Tipo de captación	Tecnología de extracción	Tipo de riego	Nº de sistemas
Copinula	Copinula y Tapaguashuya	Bomba de motor	Bomba de motor	Inundación	5
Copinula	Copinula	Represa	Ariete artesanal	Goteo	1
Copinula	Copinula	Represa	Bombeo de motor	Microaspersión	1
Copinula	Copinula	Represa	Acequia	Inundación	5

Los productores de café son actores que influyen en el recurso hídrico. Este actor se caracteriza por disponer de áreas de bosques cafetaleros, fuente importante para el abastecimiento del agua subsuperficial en la Región C, es así como Borja Nathan aporta positivamente con sus cafetales en el afluente del copinula. De copinula se extrae agua para riego en 13 sitios para un riego aproximado de 253.90 ha. y una demanda de 5,503,255.90 m<sup>3</sup> diarios, que puede ir en aumento, cubre la extensión para riego más grande de 720.85 ha. (78.69 % de la región C), conformada por el ecosistema del parque cafetero y el manglar de Metalío, que abarca los ríos Cauta, Copinula, Sunzacuapa y San Pedro Belén, es decir del río se tiene densidad de drenaje, 0.4273 Km/Km<sup>2</sup>. (PRISMA, 1981)



Figura 1.32 Extracciones aguas abajo del sitio de análisis, desde el río copinula, Cantón Morro grande (Guaymango). [1]

Tabla 1.12. Muestra la demanda diaria de agua, para riego desde algunas subcuencas de la región C. Remarcado en Rojo, los datos de interés. [1]

Subcuenca	Área regada (Ha)	Horas de riego	Consumo de agua en m <sup>3</sup>
San Pedro Belén	441.00	5,112.00	10,305,792.00
Sunzacuapa	12.45	14,510.79	103,434.93
Copinula	253.40	21,049.12	5,503,255.90

Fuente: Proyecto UINC/BASIM, 2005

El desagüe total es calculado por medio de la diferencia entre la precipitación y la evaporación de la zona, dato que se obtendrá en apartados siguientes. En la figura 1.33 se muestra que la mayoría de los drenajes superficiales están aguas abajo del sitio de análisis. En figura 1.31 y 1.41, aparecen 3 pozos vinculados a la demanda aguas arriba de las cascadas. Además se sabe que la extracción de agua para regadíos, una de ellas es en la finca Borja Nathan (por goteo en los viveros de café) y las demás son tomas, aguas debajo de donde están las cascadas de análisis.

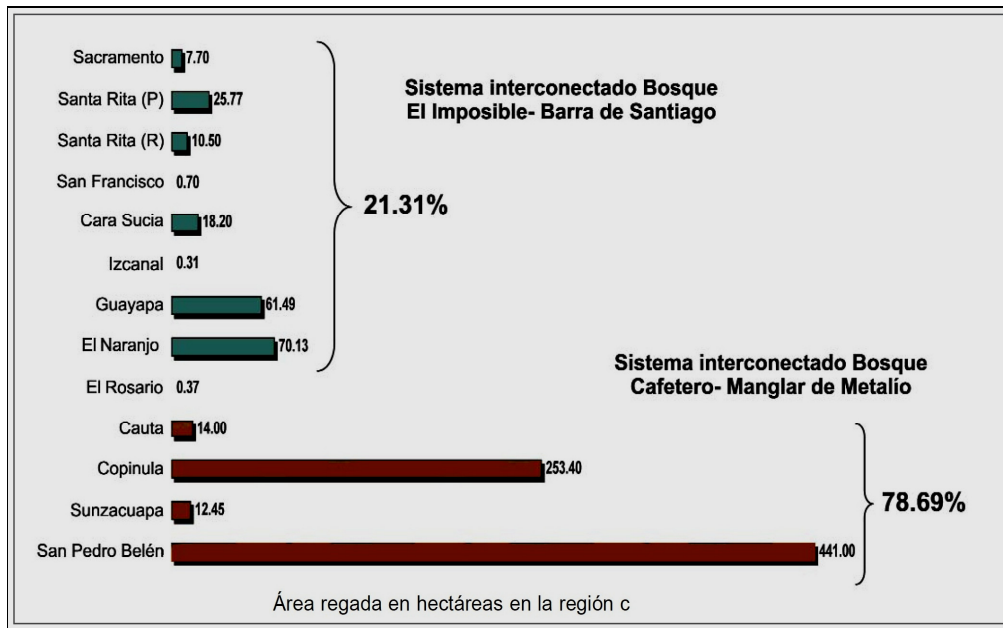


Figura 1.33 Extracciones superficiales de la región C, áreas regadas por Copinula. [1]

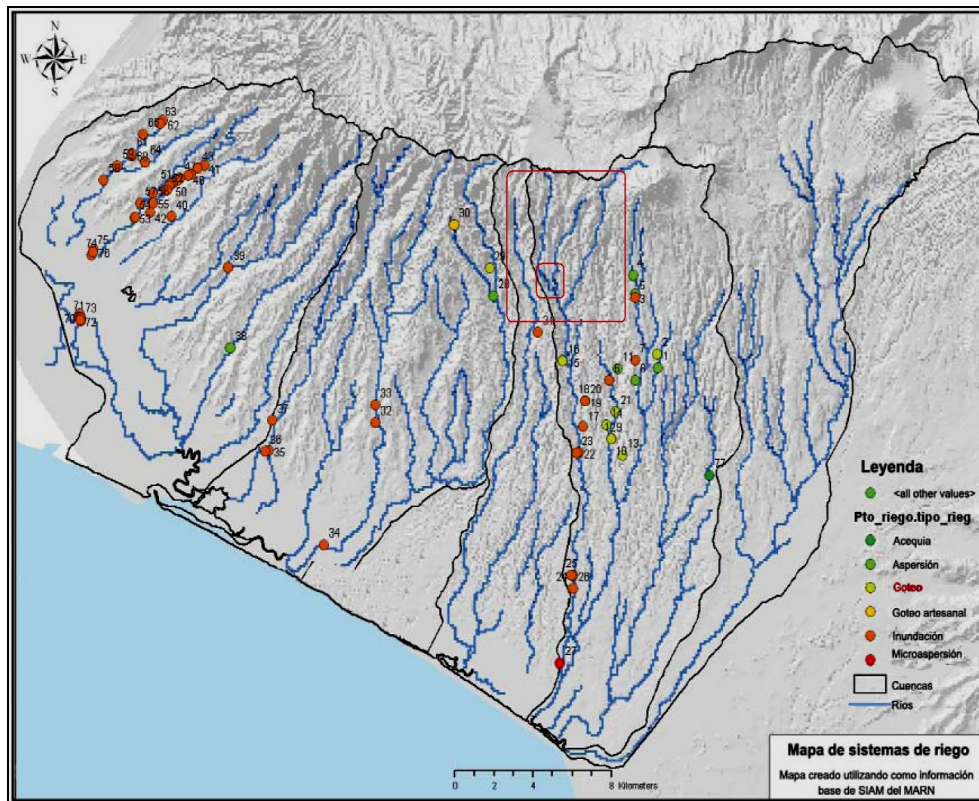


Figura 1.34 Extracciones superficiales de la región C, se puede visualizar en el recuadro que aguas arriba de la zona no hay demanda de riego. [1, en anexos, pág. 56]

**Tabla 1.13** Orden de drenaje de las cuencas de la Región C

Unidad	Número de orden del drenaje <sup>1</sup>	Área (km <sup>2</sup> )	Ejemplo	Descripción
Microcuenca	1-2-3	10-100	Ríos Sacramento a San Pedro	Quebradas-riachuelos-ríos
Subcuenca	4-5	100-700	Río Copinula Región C (674 km <sup>2</sup> )	Subcuenca de Cara Sucia, Cullapa, bocana de San Juan, Cauta y San Pedro
Cuenca	5	700-6000	Ríos Lempa y Paz	Ríos navegables

Fuente: modificado de Faustino, 2002

1.- Orden de los drenajes: se refiere a orden de magnitud de las quebradas y ríos, aumenta a medida que se conduce mayor caudal, por ejemplo la unión de dos corrientes de magnitud 1 origina una corriente de magnitud 2.

#### 1.14 Balance Hídrico en microcuenca copinula.

Para realizar el balance hídrico, es necesario considerar que la complejidad de los procesos hidrológicos, hidráulicos y meteorológicos, se deben simplificar y reducir a procesos más elementales:

- a) Precipitación (intensidad, distribución, duración)
- b) Intercepción e Infiltración (Humedad y percolación)
- c) Flujo Base (Caudales)
- d) Transformación de la lluvia eficaz en escorrentía.

El balance hídrico (cuantificación de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico) en el área cercana a las caídas de agua en la microcuenca, y la interrelación entre parámetros, da como resultado un diagnóstico de las condiciones reales del recurso en cuanto a su disponibilidad para la generación, lo cual permite desde ya establecer lineamientos y estrategias para su utilización de una manera integrada, de tal forma que se garantice su disponibilidad.

Por ser un ciclo, no tiene punto de partida, sin embargo para analizarlo, el modelo de balance hídrico se basa en la ecuación de conservación de masa:

$$\text{ENTRADAS} - \text{SALIDAS} = \text{CAMBIO DE ALMACENAMIENTO}$$

Por supuesto aplicable a la microcuenca del Río Copínula. En el modelo del Balance Hídrico del SNET<sup>17</sup>, considera las siguientes **entradas**:

- ✓ Precipitación, en la zona de Jujutla.
- ✓ Importaciones superficiales de otra cuenca, por ejemplo desde la cuenca Cauta (más cercana a río copinula).
- ✓ Retornos de la demanda. El retorno de la demanda constituye el porcentaje de agua que es devuelta al área de análisis (cuenca) debido a que no representa un uso agotador por parte de alguno de los sectores de usuarios, que para el caso será el caudal turbinado, ya aguas abajo luego de generar energía.

La evaporación y evapotranspiración, son producidas por la energía suministrada por el sol e influenciadas por las condiciones climáticas e hídricas de temperatura, radiación, viento y humedad, por tanto, las **salidas** consideradas son las siguientes:

- ✓ Evapotranspiración real,
- ✓ Evaporación de cuerpos de agua, en éste caso el río mismo en su cauce hasta antes de las cascadas.
- ✓ Evaporación en áreas suburbanas.
- ✓ Escurrimiento superficial, (de la zona, en época de lluvias).
- ✓ Demanda interna en la cuenca,
- ✓ Demanda externa de la cuenca antes de la zona de análisis (Drenajes).

---

<sup>17</sup> Tomado de las Fuentes de consulta 5 y 10.

Como Cambio de almacenamiento:

- ✓ Recarga de acuíferos,
- ✓ Variación de nivel en cuerpos de agua (lagos, lagunas, embalses), considerarlo para el caso de pequeños embalses aguas arriba de las caídas.

Lo anterior ha sido esquematizado por SNET así, y adaptado para la microcuenca:

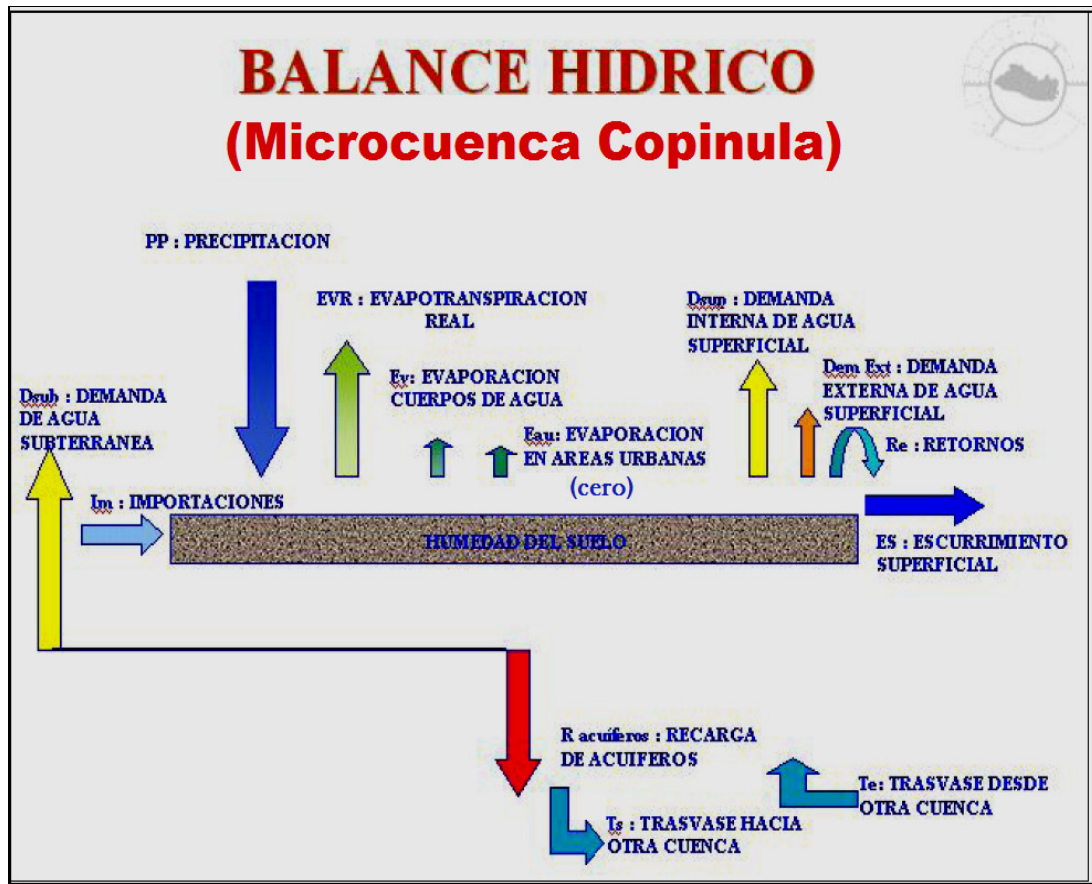


Figura 1.35. Esquema simplificado de los principales componentes para cálculos de balance hídrico en la zona de las cascadas.<sup>18</sup>

<sup>18</sup> Figura adaptada de figura 22, página 12, en fuente de consulta 10.

### *Parámetros del balance hídrico en la microcuenca de río copinula.*

Los aspectos geológicos e hidrogeológicos en el área de estudio, responde a muchos miles de años de formación y no se observan cambios geológicos dramáticos regionales, que puedan causar una reducción drástica de los caudales de estiaje del río. Pero si hay que considerar los siguientes aspectos:

La precipitación, como variable de estado hidrológica, se puede caracterizar a través de la intensidad, su distribución en el espacio y en el tiempo, y su frecuencia o probabilidad de ocurrencia, y para poder caracterizarla ha sido necesario un gran número de observaciones, extraídas de series pluviográficas [15], con el objeto de deducir el patrón de comportamiento en una zona determinada y permitir un análisis o uso posterior.

En anexos, se incluyen mapas de todo el país de precipitación o de lluvia acumulada para la serie de años 1971 al 2000, pero a la vez en la figura 1.11 aparecen datos de precipitación mensual de jujutla, datos que se tomaran para los cálculos de esorrentía y demás. La variación espacial de la lluvia se analiza a través del trazado de líneas de igual precipitación, las cuales son llamadas isoyetas.

### *El Coeficiente de Escurrimiento (C)*

El coeficiente de escurrimiento C representa la fracción de la lluvia que escurre en forma directa y toma valores entre cero y uno, y varía apreciablemente entre una cuenca y otra, y de una tormenta a otra, debido a las condiciones de humedad iniciales. Sin embargo, es común tomar valores de C representativos de acuerdo con ciertas características de las cuencas como la vegetación, pendientes del terreno y uso de suelos [15]. Tal valor está incluido en el análisis de caudal máximo y promedio de la cuenca.

## 1.15 Caudal en Rio Copinula.

### *Caudales Máximos y Promedios en la Microcuenca*

El caudal máximo o de diseño, que escurrirá por una determinada sección, bajo el supuesto que éste acontecerá para una lluvia de intensidad máxima constante y uniforme en la cuenca correspondiente a una duración  $D$  igual al tiempo de concentración de la sección. [15]

$$Q_{\text{máx}} = CiA \quad \text{Ecuación 1.3}$$

En donde:  $Q_{\text{máx}}$ , Caudal máximo en la sección de cálculo,  $C$ : Coeficiente de escorrentía medio ponderado y " $A$ ", es el Área total transversal de la microcuenca (ver figura 1.36); " $i$ " es la Intensidad media máxima para una duración igual al tiempo de concentración, de la sección de cálculo. Si bien es cierto los análisis del SNET nos permiten calcular el  $Q_{\text{máx}}$  para cualquier cuenca o microcuenca, obviando el cálculo de " $i$ "; debido a los datos estadísticos que en el país se han registrado (ver el apartado: Regionalización de caudales máximos).



Figura 1.36. Geometría de la cuenca del río copinula, aguas abajo del sitio de interés.

### *Regionalización de caudales máximos*

A partir de información del tipo de suelo, geología e Isolíneas de evapotranspiración y tomando como base preliminar la regiones hidrográficas definidas para el país, además del conocimiento de la distribución estacional, interestival, mensual y otras escalas de tiempo menores de la precipitación y de las variables climatológicas, es importante para el entendimiento del comportamiento del caudal del río.

La estimación de caudales máximos para diferentes periodos de retorno, es uno de los principales procedimientos en Hidrología, que tiene como fin la determinación del caudal de diseño para una determinada estructura hidráulica. La metodología de regionalización de caudales máximos, se basa en el uso simultáneo de los datos registrados en todas las estaciones hidrométricas ubicadas dentro de una zona considerada hidrológicamente homogénea.

El método supone que los máximos anuales dentro de la región hidrológicamente homogénea siguen una misma función de distribución y lo que varía es un factor de escala de acuerdo a las cuencas ubicada en dicha región. Lo cual se explica a groso modo así: al establecer la curva de frecuencia puntual para cada estación de la cual SNET posee datos, se debe luego ajustar los datos muestrales usando la distribución Gumbel (estadística aplicada) y evaluar los valores de  $Q_{2.33}$  y  $Q_{10}$ , caudales para período de retorno (donde se volverán a repetir) de 2.33 años y 10 años respectivamente de la curva de frecuencia puntual y calcular un factor de uniformidad para la región, definido como: [8]

$$K = \left( \frac{1}{m} \right) \sum_1^m \frac{Q_{10}}{Q_{2.33}} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Con ello se debe de determinar caudales uniformes:  $Q_K = KQ_{2.33}$

Luego, se debe de determinar el valor del periodo de retorno  $T_r$ , correspondiente a  $Q_K$ , a partir de su curva de frecuencia, dibujar sobre un grafico de probabilidades donde previamente se han trazado unos los limites de confianza, los pares de valores  $(T_r, N)$ , donde N es la longitud de registro de la

estación; luego verificar homogeneidad, si los puntos graficados se ubican dentro de los límites de confianza definidos, la región es aceptada como homogénea.

La regionalización de caudales máximos, permite la estimación de los caudales en cualquier parte del país para los periodos de retorno de 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 100 años y la regionalización de caudales medios permite la estimación de los caudales medios anuales y mensuales igualmente para cualquier cuenca. Las series hidrológicas de caudales máximos adimensionales constituidas para cada región hidrológicamente homogénea fueron ajustadas según el procedimiento mencionado usando la distribución de Gumbel. Posteriormente, según la metodología seguida por el SNET, se determinó el factor de ajuste para cada periodo de retorno en cada región hidrológicamente homogénea y por último se evaluó la relación entre las características fisiográficas de las cuencas y los caudales máximos promedios.

En la figura 1.37 se muestran las regiones hidrológicamente homogéneas para los cálculos específicos en micro cuenca copinula: región C, y región hidrológicamente homogénea 1. [8]

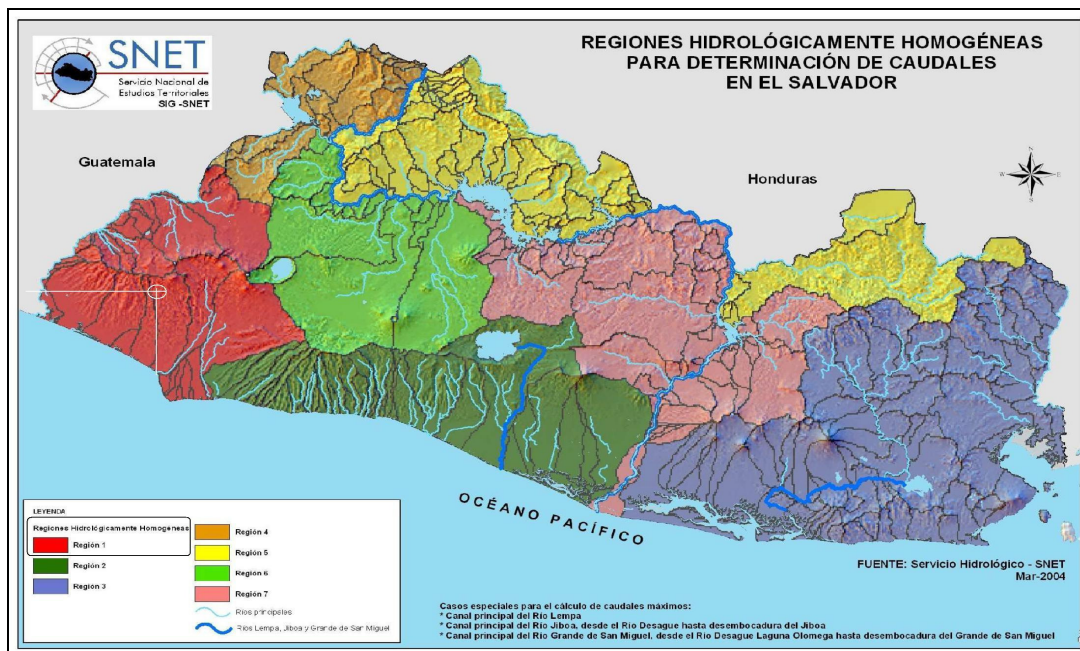


Figura 1.37. Mapa del país, donde se presentan las regiones hidrológicamente homogéneas.

[8]

Tabla 1.14 Factores de ajuste para el cálculo de caudales máximos

PERÍODO DE RETORNO	REGIÓN									
	1	2	2b	3	3b	4	5	6	7	8
5	1.64	1.50	1.39	1.40	1.54	1.50	1.51	1.42	1.38	1.40
10	2.28	1.96	1.73	1.74	2.05	1.96	1.99	1.79	1.71	1.75
15	2.68	2.24	1.93	1.94	2.36	2.24	2.28	2.01	1.90	1.96
20	2.98	2.45	2.07	2.09	2.60	2.44	2.49	2.17	2.04	2.11
25	3.23	2.61	2.18	2.20	2.79	2.61	2.66	2.30	2.15	2.22
50	4.05	3.14	2.54	2.57	3.41	3.13	3.22	2.71	2.49	2.59
100	4.96	3.71	2.90	2.94	4.08	3.70	3.81	3.14	2.84	2.98

[Documento de Regionalización de Caudales Máximos y Medios en El Salvador SNET, 2004: p. 3.5].

Es importante señalar que los años de registro de los caudales son escasos, en general para toda la Región C; por lo que se desconocen los cambios históricos en la escorrentía superficial en la zona. [5, 8]

Se registran los mayores caudales desde los meses de junio hasta octubre. Por la ubicación geográfica y patrón de las precipitaciones, además se sabe que los valores de caudales son considerablemente mayores que los drenajes del sector Poniente de la Región C.

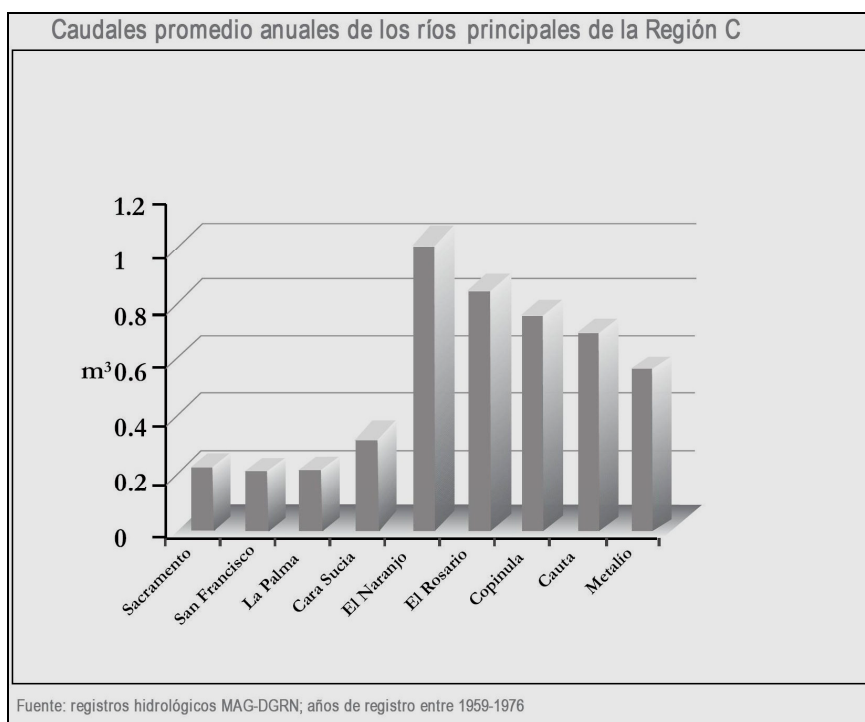


Figura 1.38. Caudales de ríos de la región C, datos hidrológicos. [2]

Para la regionalización del caudal medio, se determinó la relación entre el caudal medio anual y las características fisiográficas de la Microcuenca río copinula con la distribución mensual de los caudales anuales en cada región hidrológicamente homogénea.

*Aplicación de la regionalización de caudales máximos - método regional de índice de creciente.*

Para aplicar el método regional de Índice de Creciente, para la estimación de caudales máximos en Copinula, se sigue la siguiente metodología: [8]

1. Se ubica la región hidrológicamente homogénea a la cual pertenece la cuenca a la que se le van a estimar los caudales máximos para diferentes periodos de retorno (Mapa de regiones hidrológicamente homogéneas). Para el caso es región 1 (ver figura 1.37).
2. Se determina el caudal correspondiente al promedio de los caudales máximos ( $Q_{2.33}$ ) con base en el área de la cuenca y a la región hidrológicamente homogénea a la que pertenece, ver tabla 1.15. [5, 8]
3. El  $Q_{2.33}$  se multiplica por los factores de ajuste para los diferentes periodos de retorno (tabla 1.14) y se obtiene la información que se presenta en tabla 1.16.

**Tabla 1.15 ECUACIONES DE RELACION ENTRE EL VALOR MEDIO DE LOS CAUDALES MÁXIMOS  $Q_{2.33}$  Y EL AREA DE LA CUENCA**

REGION	ECUACION	R <sup>2</sup>	RANGO DE AREA (Km <sup>2</sup> )
1	$Q_{2.33} = 0.6839 * A + 72.986$	0.9925	100 - 1991
2	$Q_{2.33} = 2.1408 * A - 71.75$	0.9946	55 - 110
2b	$Q_{2.33} = 0.9257 * A - 172.78$	0.9275	187 - 430
3	$Q_{2.33} = 0.5871 * A + 198.91$	0.9931	100 - 1930
3b	$Q_{2.33} = 0.0701 * A + 122.32$	0.7167	1640 - 2240
4	$Q_{2.33} = 0.6758 * A + 53.357$	0.9197	25 - 200
5	$Q_{2.33} = -0.0008 * A^2 + 1.6108 * A + 4.2165$	0.991	45 - 120
6	$Q_{2.33} = 0.3519 * A + 53.544$	0.6362	45 - 845
7	$Q_{2.33} = 0.4868 * A^{1.107}$	0.9882	13 - 560
8	$Q_{2.33} = -5E-06 * A^2 + 0.3154 * A + 205.28$	0.9702	915 - 18200

$Q_{2.33}$  para la cuenca Copinula con un área mínima de de 100 km<sup>2</sup> es de:

$$Q_{2.33} = 0.6839A + 72.986$$

$$Q_{2.33} = 0.6839(100) + 72.986 = 141.376 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tabla 1.16. Cálculo de caudales máximos para la microcuenca Copinula.

<b>Caudales Máximos (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q<sub>2.33</sub></b>	<b>141.376</b>
<b>Período de retorno (años)</b>	<b>k</b>	<b>Q<sub>2.33</sub>*K</b>
5	1.64	231.85664
10	2.28	322.33728
15	2.68	378.88768
20	2.98	421.30048
25	3.23	456.64448
50	4.05	572.5728
100	4.96	701.22496

#### *Regionalización de caudales medios*

A partir de las regiones hidrológicamente homogéneas determinadas para la regionalización de Caudales Máximos, se regionalizaron los caudales medios, igualmente con el fin de poder estimar en cualquier punto del país el caudal medio, aunque no existan registros hidrométricos.

El proceso es similar al desarrollado para la regionalización de caudales máximos, pues consiste en determinar las relaciones entre el área de las cuencas que se tienen registros de sus caudales medios anuales, y la distribución de los caudales medios anuales en mensuales para cada región.

#### *Aplicación de la regionalización de caudales medios en microcuenca Copinula*

Para estimar los caudales medios mensuales en cualquier punto del país, a través de la regionalización, se siguió la siguiente metodología:

1. Se ubicó la región hidrológicamente homogénea a la cual pertenece la cuenca a la cual se le va a estimar los caudales medios (Mapa de regiones hidrológicamente homogéneas, figura 1.37). Para el caso es la región1.
2. Se determina el caudal medio anual (m<sup>3</sup>/s) con base en el área de la cuenca

y a la región hidrológicamente homogénea a la que pertenece, según la Tabla 1.17, columna del caudal promedio anual, y el área de cuenca de 100 km<sup>2</sup>, si bien es cierto que la micro cuenca sólo posee un área de 13.08 km<sup>2</sup>, la metodología define un área de cuenca entre 100 a 1991 km<sup>2</sup>.

3. Se determinan los caudales mensuales a partir del caudal medio anual y de la distribución mensual presentada en la Tabla 1.17. [5, 8]

$$Q_{Prom-Anual} = 0.0127A + 1.4954$$

$$Q_{Prom-Anual} = 0.0127(100) + 1.4954 = 2.7654 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ese dato es promedio de la cuenca, si incluimos el área hasta donde se junta el ramal de los apantes (ver recuadro sombreado en figura 1.39), que aproximadamente son 6 km<sup>2</sup> y evaluamos para  $Q_{Prom-Anual}$  se tiene:

$$(Q_{Prom-Anual})_{aguas-arriba} = 0.0127(6) + 1.4954 = 1.5716 \text{ m}^3/\text{s}, \text{ tales datos se tabulan en}$$

tabla 1.18, en la columna derecha.

Tabla 1.17. Ecuaciones de Regionalización de Caudales medios anuales y factores de distribución mensual.

Region	Caudal Promedio Anual	Factor de Distribucion Mensual											
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
1	0.0127*A + 1.4954	0.397	0.361	0.352	0.411	0.701	1.436	1.347	1.603	2.350	1.893	0.721	0.429
2	0.0103*A + 0.4433	0.278	0.216	0.197	0.196	0.363	1.031	1.175	1.898	2.985	2.441	0.788	0.389
3	0.0151*A + 0.4752	0.156	0.117	0.104	0.130	0.511	1.658	1.052	1.315	3.089	2.982	0.651	0.234
4	0.0109*A + 0.545	0.127	0.121	0.116	0.129	0.374	1.879	1.680	1.963	2.951	2.096	0.373	0.192
5	0.0304*A - 0.3231	0.113	0.084	0.079	0.115	0.400	1.874	1.516	1.815	3.240	2.100	0.444	0.166
6	2E-06*A <sup>2</sup> + 0.0156*A + 0.0944	0.496	0.470	0.450	0.479	0.671	1.235	1.517	1.718	2.186	1.537	0.700	0.541
7	- 0.00001*A <sup>2</sup> +0.0214*A-0.2529	0.273	0.237	0.226	0.251	0.421	1.471	1.303	1.646	2.970	2.201	0.670	0.331
8	0.0176*A - 10.123	0.381	0.333	0.312	0.291	0.429	1.418	1.549	1.615	2.483	2.121	0.601	0.466

Donde: A = área de la cuenca en Km<sup>2</sup> y Caudal Promedio anual en m<sup>3</sup>/s

Tabla 1.18. Caudales medios mensuales para cuenca y microcuenca Copinula.

Mes	Factor	Caudal medio mensual (m <sup>3</sup> /s).	Caudal medio mensual, aguas arriba (m <sup>3</sup> /s).
Enero	0.397	1.0978638	0.6239252
Febrero	0.361	0.9983094	0.5673476

Marzo	0.352	0.9734208	0.5532032
Abril	0.411	1.1365794	0.6459276
Mayo	0.701	1.9385454	1.1016916
Junio	1.436	3.9711144	2.2568176
Julio	1.347	3.7249938	2.1169452
Agosto	1.603	4.4329362	2.5192748
Septiembre	2.35	6.49869	3.69326
Octubre	1.893	5.2349022	2.9750388
Noviembre	0.721	1.9938534	1.1331236
Diciembre	0.429	1.1863566	0.6742164

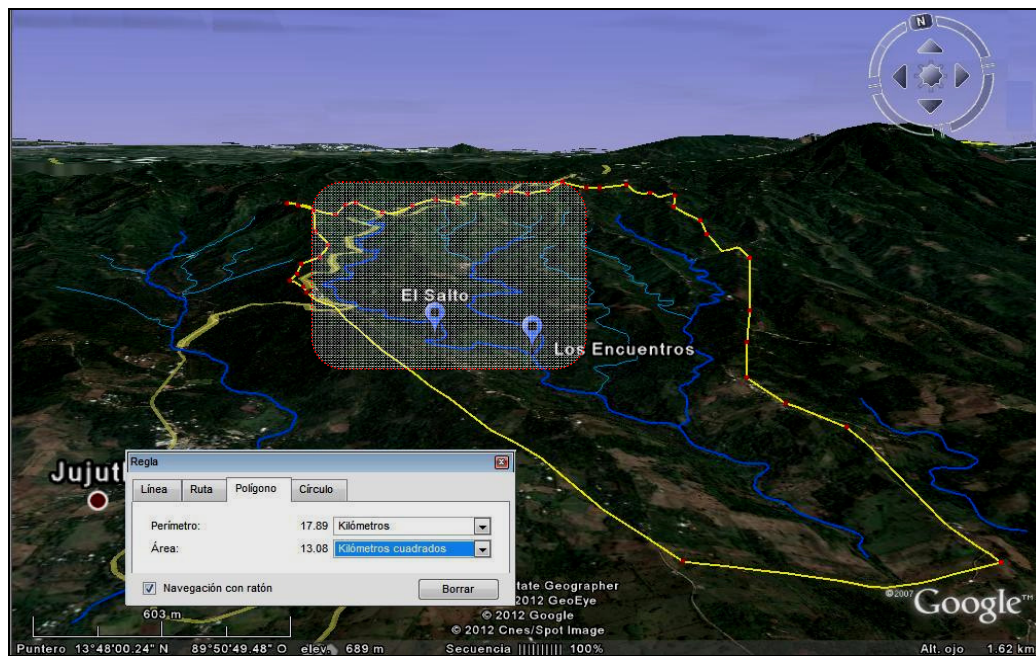


Figura 1. 39. Visor aéreo de la microcuenca (área delimitada por las líneas de color amarilla) copinula, se puede verificar el área de análisis en el recuadro sombreado.

### *Volumen mensual de extracción de agua, superficial y subterránea*

Un componente fundamental, en la ecuación de balance, es el volumen anual de la extracción de agua (superficial y subterránea). Para el caso, sólo es básicamente escorrentía subterránea y evaporación con sus conceptos asociados a ello.

### 1.16 Humedad en el Suelo

El suelo en jujutla, tiene diferente capacidad de retención de agua en función de sus características fisicoquímicas, es a saber: la estructura geológica (montaña costera: Rocas no acuíferas, latizol arcilloso rojo. Andosoles y Litosoles), la porosidad (para éste caso es, de muy baja a nula), la profundidad de los estratos superficiales de hasta 500 m), la topografía (curvas de nivel: entre 600 hasta 950 mns), la inclinación que conforma el lecho del río (aproximadamente 8°), la densidad aparente (peso seco del suelo/volumen ocupado) y la histéresis del agua en el suelo (diferencia entre la curva de humedecimiento y la de secado), aparte de las variables climáticas, son parte de un resultado global vinculado a la escorrentía superficial y subterránea.

La humedad de suelo, es dinámica con respecto al espacio y al tiempo, en respuesta a las fuerzas del movimiento del agua (capilar, gravitacional, absorción, etc.) usadas en: la percolación, la evaporación, la precipitación, durante el cambio de temperatura y la demandada de las plantas (transpiración). El esquema de la figura 1.40, ayuda a comprender el análisis del comportamiento de la microcuenca.

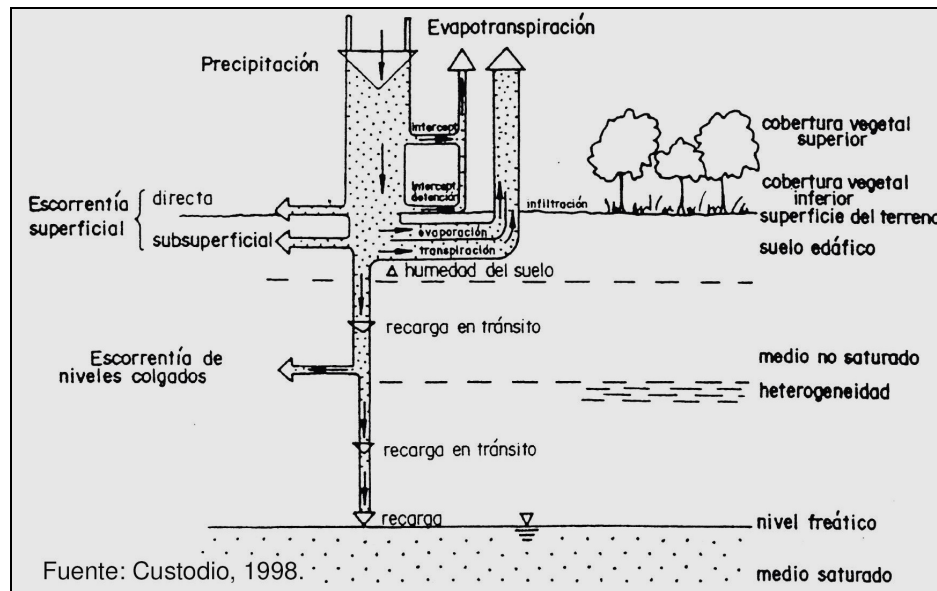


Figura 1.40, Distribución de la aportación pluviométrica en sus diferentes componentes. [5]

El intervalo de tiempo para el balance superficial será un mes, y para el subterráneo un año, sin embargo para este último se hará una desagregación mensual tomando en cuenta la distribución en el tiempo de algunas de las variables hidrológicas.

La ecuación de balance, tomando como plano de referencia la superficie, se plantea como:

$$\Delta V = (VII + Cp + Ar + Re + Im + Sm + B) - (Ab + U + Ev + Ex + ET + In) \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Donde:

- $\Delta V$  Variación de volumen,
- VII Volumen de lluvia,
- Cp Escurrimiento natural por cuenca propia,
- Ar Escurrimiento aguas arriba,
- Re Retornos de agua,
- Im Importaciones desde cuencas vecinas,
- Sm Salida de agua por manantiales (escorrentía subterránea)
- B Extracciones por bombeo dentro de la cuenca
- Ab Escurrimiento a la salida de la cuenca (aguas abajo),
- U Usos del agua (volúmenes de consumo, que para la aplicación en copinula es aproximadamente cero).
- Ev Evaporación en cuerpos de agua,
- Ex Exportaciones hacia cuencas vecinas (en figura 1.41, se muestra que superficialmente no se transfiere agua hacia cuencas vecinas).
- ET Evapotranspiración,
- In Infiltración de lluvia

Todas las variables son volúmenes de agua, expresadas en hectómetros cúbicos ( $\text{hm}^3$ ) y el intervalo de tiempo es de un mes. [5]

### 1.17 Evaporación

La mayor pérdida de agua en la micro cuenca, es debido a la evapotranspiración la cual es una combinación de pérdida de agua por evaporación en el suelo hacia el aire (relacionado con la humedad relativa) y la transpiración de las plantas.

Es determinada por los siguientes factores: humedad relativa, temperatura y presión atmosférica y velocidad del viento de la zona, durante el día y durante todo el año. Esto implica además del proceso como tal, de la pérdida de agua por la transpiración de la plantas.

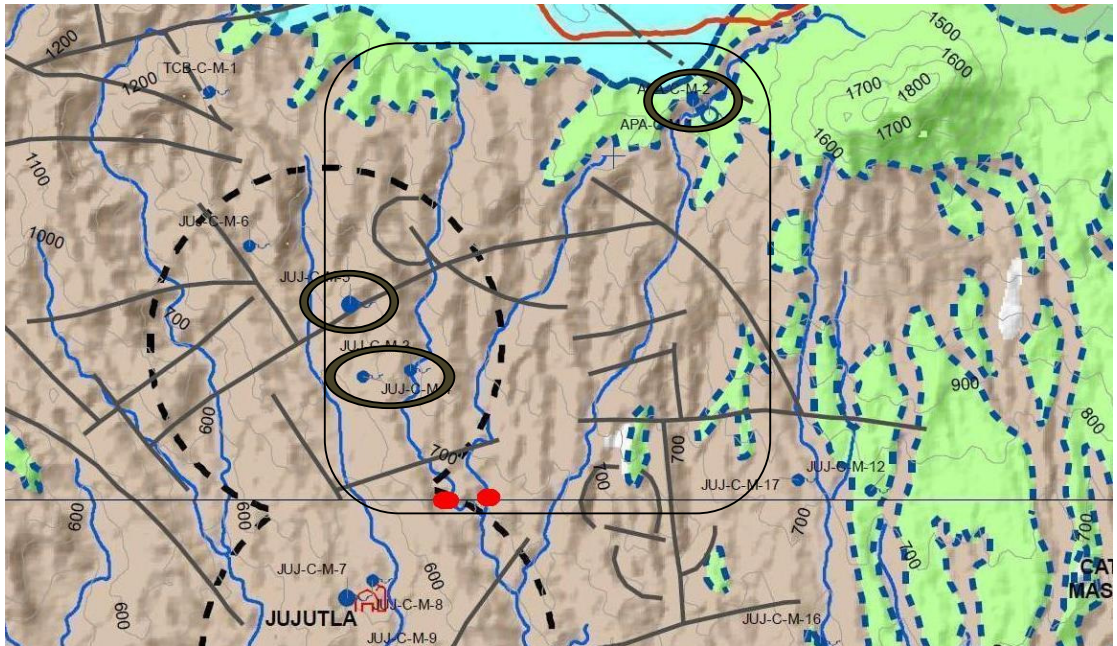


Figura 1.41. Se verifica que en la zona (enmarcada), la demanda externas, es la extracción desde 4 pozos.

### 1.18 Evapotranspiración.

El término evapotranspiración involucra los conceptos de Evapotranspiración de Referencia (pérdida de agua por evaporación y la transpiración de un cultivo tomado como referencia a las gramíneas o pastos, debido a condiciones climáticas, Generalmente es simbolizada como  $ET_0$ ),

Evapotranspiración de Cultivo (**ET<sub>c</sub>**: se produce cuando no existe ninguna restricción de agua en el suelo y depende de las condiciones de los cultivos tales como sus características, el ritmo de desarrollo de las plantas en el periodo vegetativo y las condiciones climáticas de temperatura, viento y humedad relativa) y Evapotranspiración Real (depende de la cantidad de humedad existente en el suelo).

Se evalúa numéricamente así: [10]

$$\text{Evapotranspiración} = ET_o + ET_c + Ev. \text{ Real} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Como es difícil medir esos procesos por separado, y además en la mayor parte de los casos lo que interesa es la cantidad total de agua que se pierde a la atmósfera, se calculan conjuntamente bajo el concepto mixto de evapotranspiración. En la evaluación de la evapotranspiración media en el país, se analizó la Evapotranspiración de Referencia, la Evapotranspiración de Cultivo y la Evapotranspiración Real, a nivel de cuenca y de región hidrográfica.

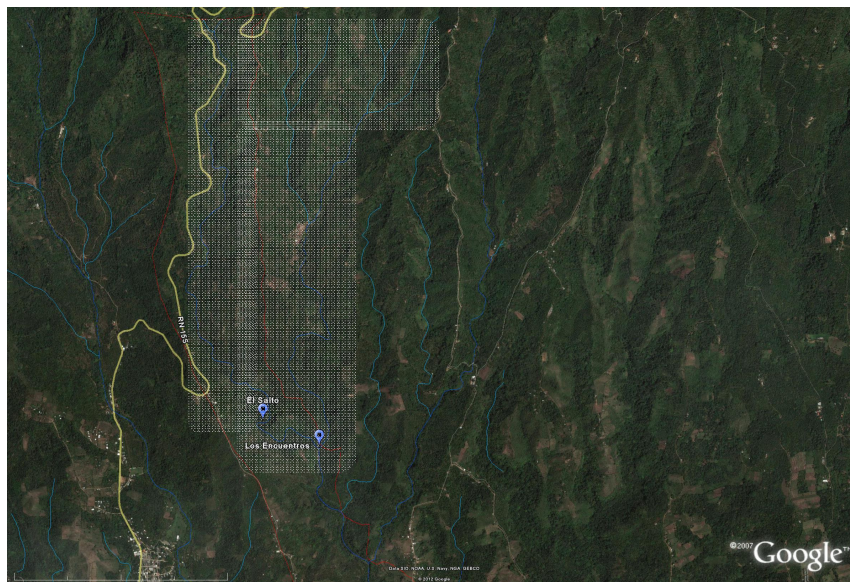


Figura. 1.42. Microcuenca Copinula o zona de análisis para la evaporación.

### 1.19 Cálculo de la evaporación en los cuerpos de agua

La evaporación de los cuerpos de agua, para nuestro caso el embalse agua arriba de la generación, es uno de los componentes de la ecuación de balance, ésta variable se evalúa en forma independiente.

Debido que se cuenta con registros climatológicos diarios de humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar, así como temperatura media, se recomienda utilizar la fórmula de Penman. [5]

$$E_p = \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left( \frac{h_o - G}{HV} \right) + \left\{ \left( \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) f(V) [e(a) - e(d)] \right\} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Donde

$E_p$  Evaporación potencial diaria, mm

$\gamma$  =  $6.66e^{10^{-4} PB}$ ; Constante psicrométrica, kPa/°C

$h_o$  Radiación neta, MJ/m<sup>2</sup>; los resultados de la radiación obtenidos en kWh/m<sup>2</sup>/día por lo que se tienen que convertir a unidades MJ/m<sup>2</sup> para sustituirse en la ecuación de Penman.

$$\Delta = \left( \frac{e(a)}{T + 273} \right) \left\{ \frac{6791}{(T + 273) - 5.03} \right\}; \text{ Pendiente de la curva de presión de vapor}$$

de saturación, kPa/°C

$G$  Flujo de calor del suelo, MJ/m<sup>2</sup>. Puede considerarse cero.

$HV$  =  $2.5 - 0.0022 T$ , Calor latente de vaporización, MJ/kg

$f(V)$  =  $2.7 + 1.63V$ ; Función de la velocidad del viento, m/s a 10 m sobre el suelo.

$e(a)$  =  $0.1e^{\left[ 54.88 - 5.03 \ln(T + 273) - \left( \frac{6791}{T + 273} \right) \right]}$ ; Presión de vapor de saturación a la temperatura media del aire, kPa

$e(d)$  =  $e(a) RH$ ; Presión de vapor a la temperatura media del aire, kPa.

$T$  Temperatura media diaria en °C

RH Presión de vapor en kPa

Todas las variables se deben evaluar con los datos obtenidos para la zona de Jujutla.

### *Evapotranspiración de Referencia*

Se define como la evapotranspiración de una superficie extensa de gramíneas de 8 - 15 cm de altura, uniforme, de crecimiento activo, que asombran totalmente el suelo y que no escasean de agua. Su determinación se realiza a partir de datos climáticos, empleando diferentes fórmulas empíricas, cuya elección para el cálculo depende básicamente del tipo de datos climáticos disponibles en la zona.

Según SNET, la formula de Hargreaves presentó los resultados más cercanos a la formula de referencia.

Las ecuaciones de tabla 1.19. [10] deberán evaluarse para cada mes y para altitudes mínima de 600 msnm y máxima de 950 msnm, valores de altitud para de la microcuenca de copinula y el ramal de los apantes. Ver figura 1.41 y 1.42.

**Tabla 1.19.** Ecuaciones de correlación Altitud – Evapotranspiración de Referencia.

MES	ECUACION DE CORRELACION	R <sup>2</sup>
ENERO	$y = -7E-06x^2 - 0.017x + 152.95$	R2 = 0.8791
FEBRERO	$y = -8E-06x^2 - 0.0164x + 156.04$	R2 = 0.8707
MARZO	$y = -1E-05x^2 - 0.0171x + 190.42$	R2 = 0.8206
ABRIL	$y = -9E-06x^2 - 0.0202x + 194.52$	R2 = 0.8298
MAYO	$y = -7E-06x^2 - 0.0237x + 186.89$	R2 = 0.8378
JUNIO	$y = -7E-06x^2 - 0.0181x + 165.79$	R2 = 0.8871
JULIO	$y = -9E-06x^2 - 0.0127x + 175.28$	R2 = 0.8311
AGOSTO	$y = -8E-06x^2 - 0.0122x + 170.12$	R2 = 0.8481
SEPTIEMBRE	$y = -8E-06x^2 - 0.0126x + 150.42$	R2 = 0.8832
OCTUBRE	$y = -1E-05x^2 - 0.0094x + 149.56$	R2 = 0.8791
NOVIEMBRE	$y = -9E-06x^2 - 0.0119x + 142.18$	R2 = 0.8836
DICIEMBRE	$y = -7E-06x^2 - 0.0168x + 144.91$	R2 = 0.8928

Donde: y = Evapotranspiración de Referencia (mm/mes)      x = Altitud (msnm)

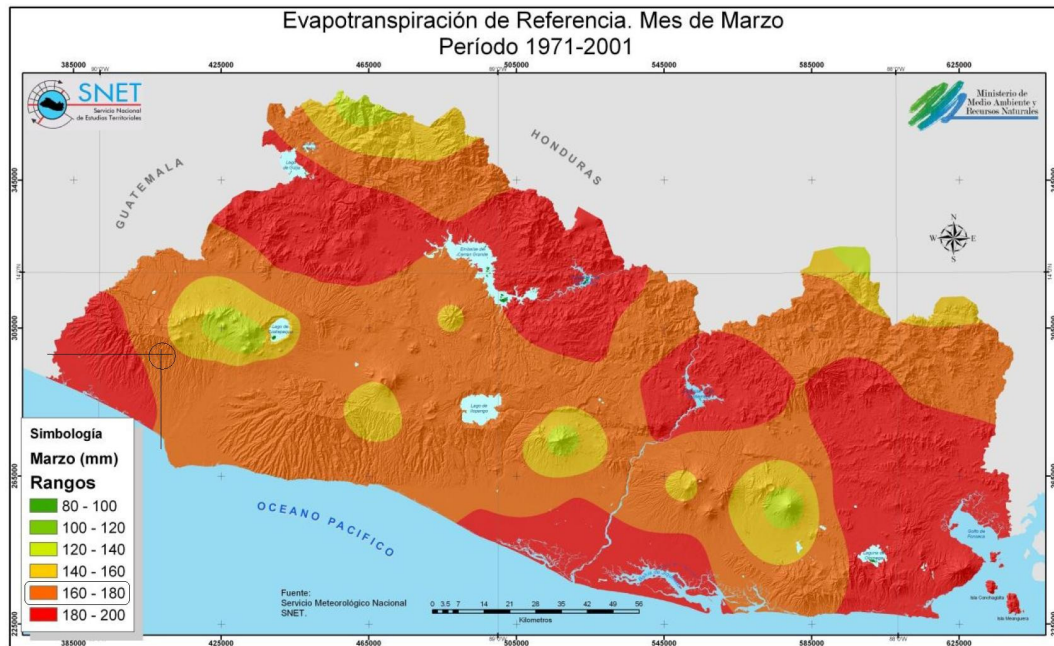


Figura 1.43. Mapa de Evapotranspiración de referencia en marzo. Remarcado está el dato de valores en la zona de ubicación de la microcuenca; con un rango anual entre 160 a 180 mm/mes. [10]

La evapotranspiración de referencia que ha calculado el Servicio Meteorológico Nacional del SNET, lo hace a través de la fórmula de Hargreaves, la cual involucra temperatura, radiación solar y humedad relativa. Se trazaron isóneas de Evapotranspiración de Referencia a nivel mensual y anual, las cuales fueron cruzadas con los mapas de cuencas del país, y se calcularon la Evapotranspiración de Referencia media por cuenca y por región hidrográfica.

En figura 1.43, se presenta sólo los datos de un mes (Marzo), lo cual se verifica con la información correspondiente obtenida con los datos de la tabla 1.19, al aplicar las ecuaciones de correlación, para cada mes en la zona de las cascadas que tiene una variación en altura sobre el nivel del mar entre los 600 a 950 nsnm, resultados que se presentan en tabla 1.21.

*Evapotranspiración de Cultivo (ET<sub>c</sub>). Necesidades hídricas de las plantas y su incidencia en la conservación o pérdida de agua en el suelo*

La evapotranspiración de cultivo es aquella que se produce cuando no existe ninguna restricción de agua en el suelo y depende de las condiciones de los cultivos por sus características, el ritmo de desarrollo de las plantas (periodo vegetativo) y las condiciones climáticas de temperatura, viento y humedad relativa.

Para englobar los efectos de las características del cultivo sobre las necesidades de agua, se han desarrollado unos coeficientes de cultivo  $K_c$ , los cuales relacionan la evapotranspiración de referencia  $ET_0$ , con la evapotranspiración de cultivo  $ET_c$ , y representan la evapotranspiración de un cultivo en condiciones óptimas, que produzca rendimientos óptimos.

La evapotranspiración de cultivo se calcula mediante la siguiente ecuación: [10]

$$ET_c = K_c * ET_0 \quad \text{Ecuación 1.7}$$

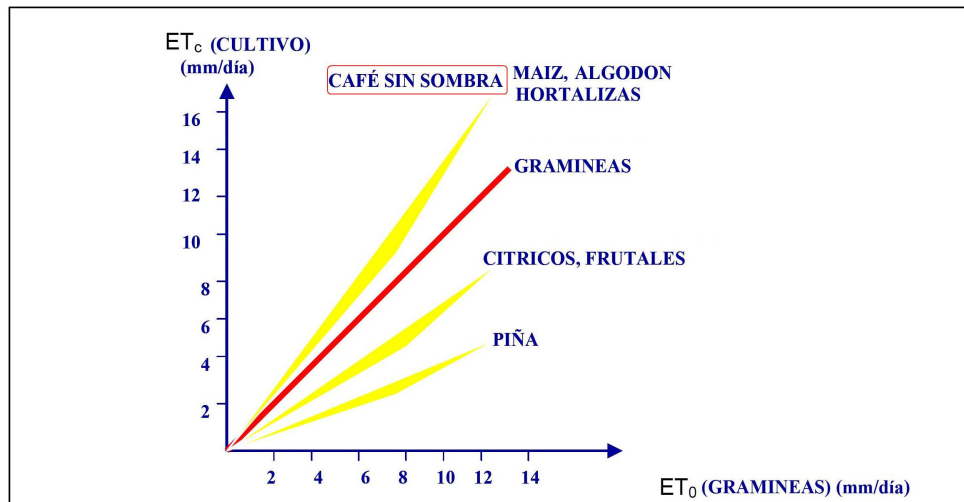
Donde:  $ET_c$  = Evapotranspiración del cultivo en mm/día

$ET_0$  = Evapotranspiración de referencia en mm/día

$K_c$  = Coeficiente de cultivo (adimensional)

Las características del cultivo influye en la pérdida de agua a través de la evapotranspiración, de acuerdo a la fisiología de las mismas, específicamente del mecanismo a oponer resistencia a la transpiración a través de los estomas de las hojas (los estomas son las células que permiten el intercambio de dióxido de carbono y oxígeno con el exterior). Las plantas pierden menor cantidad de agua al inicio de su desarrollo (germinación y crecimiento inicial), que cuando están en su fase de mediados del periodo, que corresponde a la etapa de maduración donde presenta un requerimiento hídrico mayor.

En la Figura 1.44 se presenta una comparación realizada por la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO) de evapotranspiración diaria de diferentes tipos de cultivo en comparación con las gramíneas, que es el cultivo que se toma como referencia y en este caso el interés es en comparar el cafetal que es parte del cultivo principal en la microcuenca.



Magnitudes de la ET<sub>c</sub> (cultivo) en comparación de la ET<sub>0</sub> (gramíneas) (Fuente FAO).

Figura 1.44. Comparación entre el café sin sombra (cultivo en la microcuenca) con las gramíneas o cultivo de referencia. [10]

Tabla 1.20. COEFICIENTES DE CULTIVO

VEGETACIÓN	Kc Inicio	Kc Desarrollo de Cultivo	Kc Medios de período	Kc final
ARROZ	1.1	1.1 - 1.3	1.3	1.3 - 1
CAÑA DE AZÚCAR	0.6	0.6 - 1.15	1.15	1.15 - 0.85
CAFÉ SIN SOMBRA	1.05	1.05 - 1.1	1.1	1.1

Tabla 1.21, Resultados mensuales con datos mensuales de evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) en la micro cuenca.

<b>(Kc, Prom.): cultivo cafetal sin sombra.</b>			<b>1.1</b>	
	<b><math>ET_0 =</math> Evapotranspiración de referencia en mm/día</b>		<b><math>E_c =</math> Evapotranspiración del cultivo en mm/día</b>	
<b>Mes\Altura</b>	<b>600 msnm</b>	<b>950 msnm</b>	<b>600 msnm</b>	<b>950 msnm</b>
<b>ENERO</b>	140.23	130.4825	154.253	143.53075
<b>FEBRERO</b>	143.32	133.24	157.652	146.564
<b>MARZO</b>	176.56	165.15	194.216	181.665
<b>ABRIL</b>	179.16	167.2075	197.076	183.92825
<b>MAYO</b>	170.15	158.0575	187.165	173.86325
<b>JUNIO</b>	152.41	142.2775	167.651	156.50525
<b>JULIO</b>	165.14	156.8975	181.654	172.58725
<b>AGOSTO</b>	159.92	151.31	175.912	166.441
<b>SEPTIEMBRE</b>	139.98	131.23	153.978	144.353
<b>OCTUBRE</b>	140.32	131.605	154.352	144.7655
<b>NOVIEMBRE</b>	131.8	122.7525	144.98	135.02775
<b>DICIEMBRE</b>	132.31	122.6325	145.541	134.89575

#### *Evapotranspiración Real – Capacidad de Agua Disponible en los Suelos*

El suministro de humedad a la superficie de evaporación, es un factor determinante en la evapotranspiración. A medida que el suelo se seca, la tasa de evapotranspiración cae por debajo del nivel que generalmente mantiene en un suelo bien humedecido, es esta evapotranspiración que depende de la cantidad de humedad existente en el suelo, la que se denomina Evapotranspiración Real.

La humedad del suelo está relacionada con la capacidad de agua disponible en el suelo (llamada también Agua Útil: diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente), la cual es función de la textura y estructura del suelo y es la que puede ser evapotranspirada o aprovechada por las plantas. El contenido total de esta agua útil constituye la Reserva de Agua del suelo.

Cuando hay una lluvia copiosa, el agua que se infiltra en el suelo llena

todos los poros y desaloja la totalidad del aire, llegando el suelo a su capacidad de saturación. Esta situación es temporal en la medida que no haya más infiltración de agua, ya que los macroporos permiten una rápida circulación descendente del agua y favorecen que el agua se incorpore a las capas freáticas. Ver esquema de figura 1.40.

Tabla 1.22. Datos de humedad del suelo, para el caso en jujutla corresponde a un suelo franco arcilloso. [5]

Textura	Punto de Marchitez (agua por pie de profundidad)			Capacidad de Campo (agua por pie de profundidad)			Capacidad de Agua Disponible (agua por pie de profundidad)		
	(%)	(pulg)	(mm)	(%)	(pulg)	(mm)	(%)	(pulg)	(mm)
Arena Media	1.7	0.3	7.62	6.8	1.2	30.48	5.1	0.9	22.86
Arena Fina	2.3	0.4	10.16	8.5	1.5	38.1	6.2	1.1	27.94
Franco Arenoso	3.4	0.6	15.24	11.3	2	50.8	7.9	1.4	35.56
Franco Arenoso Fino	4.5	0.8	20.32	14.7	2.6	66.04	10.2	1.8	45.72
Franco	6.8	1.2	30.48	18.1	3.2	81.28	11.3	2	50.8
Franco Limoso	7.9	1.4	35.56	21.5	3.8	96.52	14.0	2.4	61.34
<b>Franco Arcilloso</b>	<b>10.2</b>	<b>1.8</b>	<b>45.72</b>	<b>21.5</b>	<b>3.8</b>	<b>96.52</b>	<b>11.3</b>	<b>2</b>	<b>50.8</b>
Arcilloso	14.7	2.6	66.04	22.6	4	101.6	7.9	1.4	35.56

Punto de Marchitez Permanente, Capacidad de Campo y Capacidad de Agua Disponible para suelos de varias Texturas.

Fuente: Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)

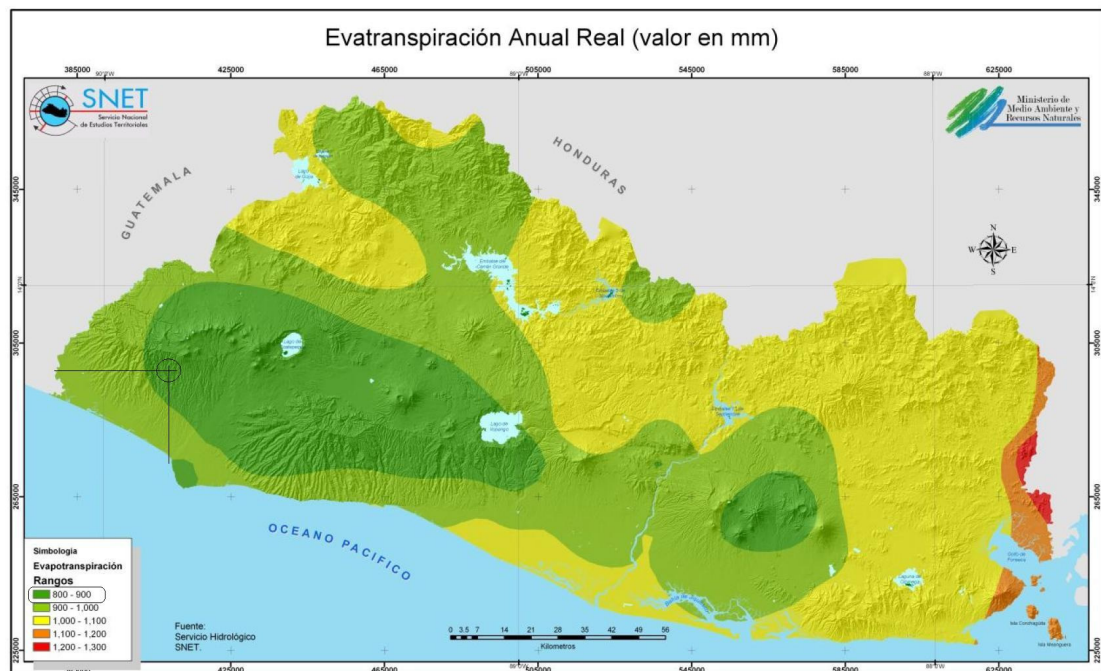


Figura 1.45. Datos acumulados de evapotranspiración anual real (Se indica referencia de la zona). [10, anexos]

### *Evaporación y evapotranspiración de las aguas subterráneas*

En el ámbito de la evaporación de las aguas subterráneas, se sabe que el recurso no alcanza nunca la atmósfera mediante un proceso de evaporación directa, a no ser que el nivel freático de las formaciones acuíferas esté situado a muy pocos decímetros de la superficie del suelo. No obstante, el consumo de agua por parte de las plantas constituye un medio de descarga del agua subterránea mucho más importante que la evaporación directa desde los acuíferos.

Se considera que la descarga de agua subterránea por evaporación directa, se estima multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por una lámina de agua (mm/mm: milímetros de agua por milímetros de profundidad de suelo) equivalente a una fracción de la evaporación potencial medida en las estaciones climatológicas. El valor de esa fracción varía entre un máximo de uno, cuando el nivel freático (parte superior de la zona saturada de agua) aflora, y cero cuando éste se halla a profundidades mayores entre la superficie del terreno y el nivel freático; para el caso se desconoce la profundidad del nivel freático en la zona.

Tomando en cuenta el espesor efectivo de las raíces de los cultivos en la zona y el consumo de agua subterránea por algunas plantas, así como la profundidad del nivel estático en el río, se determina si se está llevando a cabo o no un proceso de evapotranspiración del agua subterránea.

#### **1.20 Escorrentía superficial**

Cuando la lluvia cae sobre la cuenca y los niveles de infiltración y de evaporación son iguales o inferiores a la intensidad del aguacero, comienza el fenómeno de escorrentía sobre toda la superficie de la cuenca afectada por el aguacero. El poder erosivo de la escorrentía superficial en las lomas que configuran el municipio es elevado debido a la fuerte precipitación y al gradiente topográfico, aunque es necesario señalar que la densa vegetación puede contrarrestar este efecto en gran medida. Sólo en algunas quebradas se

ha podido observar el dominio estructural sobre el drenaje.

La naturaleza y composición de los distintos materiales geológicos determinan la capacidad de infiltración del agua y las zonas de recarga del lugar.

Debido que el suelo juega un papel importante en el movimiento de la escorrentía superficial, porque en el se desarrolla la vegetación que a su vez lo protege contra la erosión, permitiendo que el impacto de las lluvias se amortigüen en la cobertura vegetal, haciendo que el agua alcance el suelo con menor velocidad y disponga de menos energía y más tiempo para su transporte.

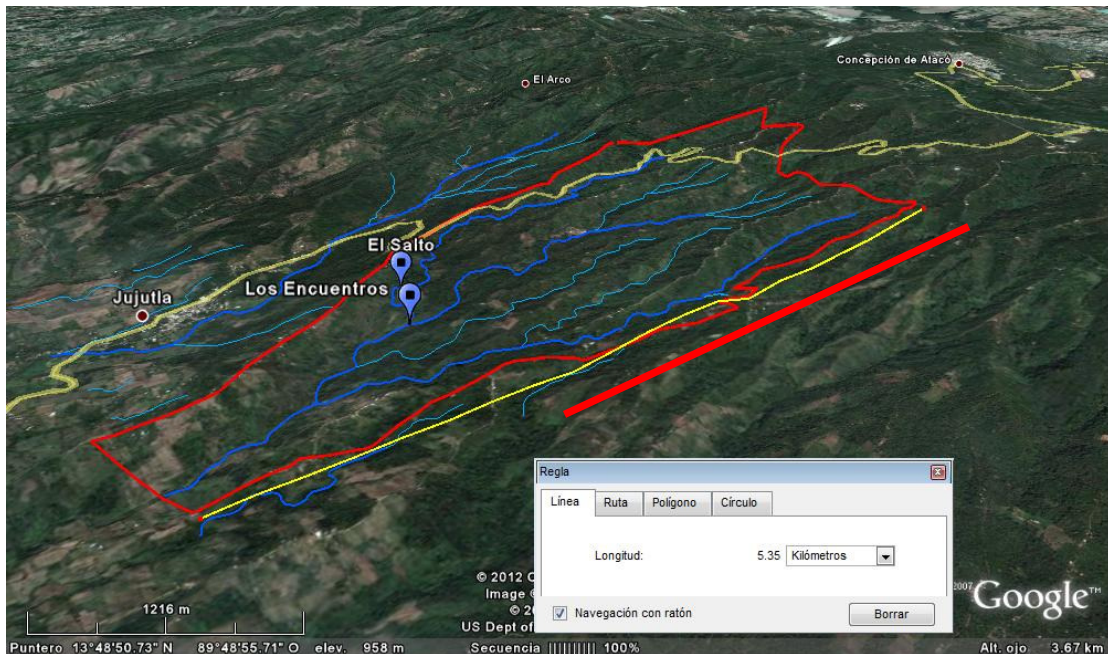


Figura 1.46. Se muestra en detalle la zona para la relación precipitación – escorrentía. 5.35 son los km. aguas arriba del análisis.

La determinación de la escorrentía superficial se articula en dos fases:

- Determinación de la lluvia eficaz
- Transformación precipitación-escorrentía

El cálculo de la lluvia eficaz, es decir, la cantidad de precipitación que

realizará un aporte efectivo a la escorrentía y los conceptos asociados son:

- ✓ Pérdida Inicial: Abstracción inicial en mm, que debe ser satisfecha antes que la escorrentía ocurra.
- ✓ Tasa de Pérdida Constante (Constant Loss Rate): Pérdida de lluvia uniforme (mm/h) que inicia, después de que la pérdida inicial ha sido completamente satisfecha.
- ✓ Impermeabilidad (Impervious %): Porcentaje de la subcuenca para el cual no se calculan pérdidas.

#### *Cálculo del volumen de escurrimiento virgen por cuenca propia*

Este es el parámetro que caracteriza al potencial de los recursos hídricos superficiales de la microcuenca hidrológica en copinula, numéricamente se calcula así: [5]

$$Cp = (Ab + U + Ev + Ex) - (Ar + Re + Im) + \Delta V \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Donde:

Cp    Escurrimiento natural en la propia cuenca,

$\Delta V$     Cambio de almacenamiento en el río, en un tiempo estipulado de balance,

Ar    Escurrimiento aguas arriba,

Re    Retornos de agua, será igual a todo el caudal turbinado que se devuelve al cauce del río, aguas abajo del punto de generación.

Im    Importaciones desde cuencas vecinas, (en figuras 1.41 y 1.42, se muestra que superficialmente no se transfiere agua desde cuencas vecinas, por tanto se considera igual a cero).

Ab    Escurrimiento a la salida de la cuenca (aguas abajo)= volumen aforado.

U    Usos del agua (volúmenes de consumo, que para la aplicación en copinula es aproximadamente cero).

Ev    Evaporación en cuerpos de agua, ver apartado 1.19.

$E_x$  Exportaciones hacia cuencas vecinas (se considera cero, igual que  $I_m$ ).

Todas las variables son volúmenes de agua, expresadas en hectómetros cúbicos ( $hm^3$ : volumen de un cubo de 100 m) y el intervalo de tiempo es de un mes.

En las cuencas situadas en las zonas altas y que contribuyen únicamente con el escurrimiento que se genera en ellas,  $A_r$  es cero. Actualizando para la microcuenca se tiene:

$$C_p = (A_b + E_v) - R_e + \Delta V \quad \text{Ecuación 1.9}$$

En la ecuación 1.9 se desconoce sólo  $A_b$  y el volumen total de recarga.

#### *Volumen medio de escurrimiento a la salida de la cuenca*

Para determinar los volúmenes mensuales de escurrimiento, aguas abajo de la cuenca, se analiza la siguiente ecuación: [5]

$$A_b = (C_p + R_e + I_m) - (U + E_v + E_x) - \Delta V \quad \text{Ecuación 1.10}$$

Actualizando para la microcuenca se tiene:

$$A_b = (C_p + R_e) - \Delta V - E_v \quad \text{Ecuación 1.11}$$

Igualmente que en caso anterior, se desconoce  $C_p$  y  $\Delta V$ .

### **1.21 Relación Precipitación – Escorrentía**

Con las series de datos pluviales de años anteriores, SNET analizó las relaciones existentes a nivel mensual de estas dos variables. La precipitación tomada en la relación corresponde a la precipitación media areal mensual y la escorrentía a las registradas en las estaciones hidrométricas, en unidades de mm.

Adicionalmente se analizaron comparativamente el escurrimiento en mm en función de la lluvia, con el fin de verificar para las zonas establecidas un similar comportamiento hidrológico reflejado mensualmente. A partir de estos criterios se determinaron factores mensuales que relacionan estas dos

variables y se llevó a cabo una zonificación basada en diez zonas características con similares condiciones fisiográficas, geológicas, tipos y usos de suelo. Para la zona de jujutla, le correspondió la zona 1 (figura 1.47).

Para llevar a cabo la determinación de los valores de escorrentía superficial, se multiplican los factores correspondientes a los meses y zona donde se ubica la subcuenca de interés por su respectiva precipitación areal, obteniéndose el escurrimiento (ambos en mm).

Las precipitaciones medias areales se determinan a partir de mapas mensuales, obteniéndose las precipitaciones para las cuencas de interés y en este caso para Jujutla. Ver anexo 1 y 2.

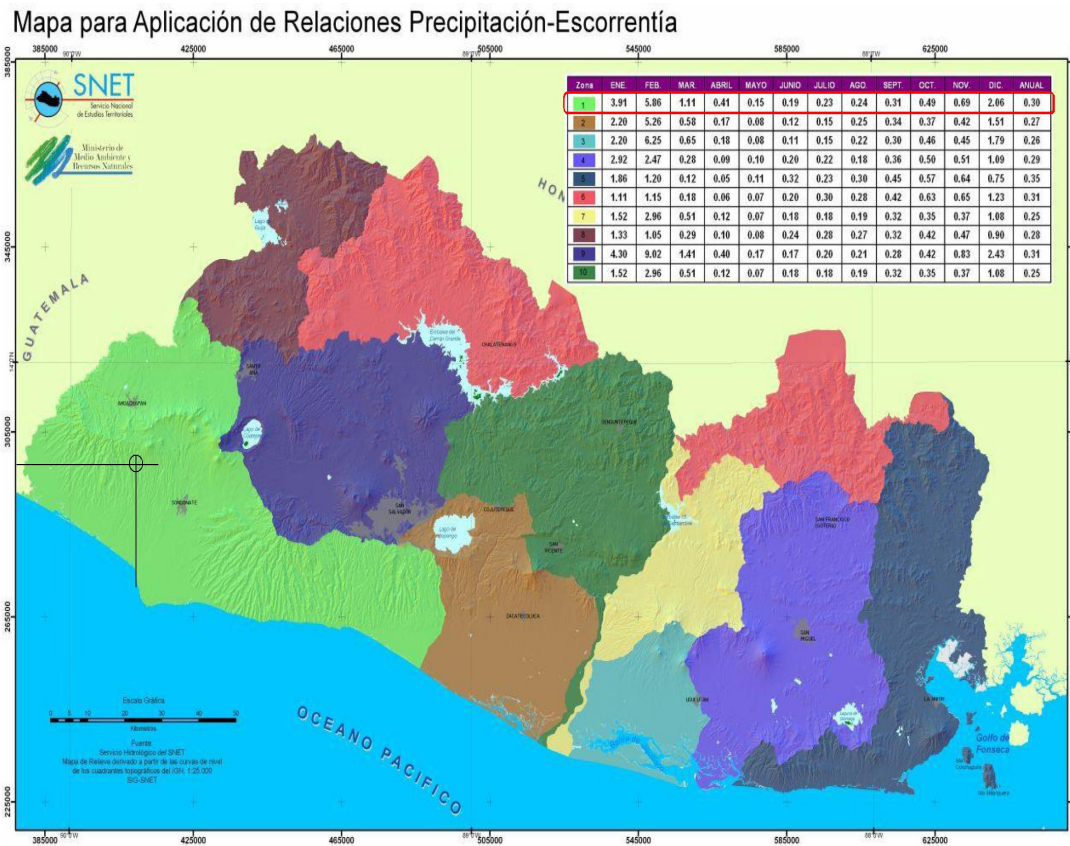


Figura 1.47, muestra los datos de precipitación – escorrentía de la zona de análisis, los cuales aparecen en la tabla 1.23. [6,10]

Tabla 1.23. Factores de relación Precipitación – Escorrentía, para cada mes del año, específicamente para la zona 1 (color verde) en el mapa de la figura 1.47, correspondiente a el área de interés.

Mes	Factor (zona verde)	Precipitación en copinula	Escorrentía Superficial
Enero	3.91	2	7.82
Febrero	5.86	5	29.3
Marzo	1.11	15	16.65
Abril	0.41	60	24.6
Mayo	0.15	260	39
Junio	0.19	440	83.6
Julio	0.23	340	78.2
Agosto	0.24	400	96
Septiembre	0.31	500	155
Octubre	0.49	360	176.4
Noviembre	0.69	300	207
Diciembre	2.06	5	10.3

Los valores de escorrentía de la tabla anterior son los datos vinculados a  $C_p$ , que son valores mensuales en  $Hm^3$ .

#### *Escorrentía subterránea*

Asociadas a las discontinuidades estructurales se encuentran arcillas que dificultan la infiltración y dependiendo del grado de desarrollo de estas en los planos de discontinuidades, así también será el grado de permeabilidad, que por lo general es baja, y debido a la presencia de estratos piroclásticos (franjitas o capas de roca ígnea) subyacentes, se forman acuíferos colgados de poca extensión en la zona.

#### *Cálculo del balance de agua subterránea*

Recordando que el balance hidrogeológico, tiene como fundamento la ecuación de continuidad, en la que se establece que la diferencia entre las salidas y las entradas de masa, en un tiempo determinado son iguales al cambio de almacenamiento del volumen de control. Así, la ecuación empleada

para ello se presenta a continuación: [5]

$$\Delta V = I + R_i + E_s - ET_z - S_m - B \quad \text{Ecuación 1.12}$$

Donde:

$\Delta V$  Cambio en el volumen almacenado en el área y en el tiempo estipulado de balance, variación de volumen,

$R_i$  Recarga inducida: retornos de riego, fugas en los sistemas de abastecimiento de agua de las zonas urbanas (no existen) y aporte de agua por las arcillas.

$I$  Infiltración-recarga de agua de lluvia,

$S_m$  Salida de agua por manantiales,

$B$  Extracciones por bombeo dentro de la cuenca,

$E_s$  Entradas de agua al sistema por flujo lateral subterráneo proveniente de las fronteras de la zona de balance y por otros acuíferos,

$ET_z$  Evapotranspiración de la zona saturada,

Todas las variables son volúmenes de agua expresadas en  $hm^3$ .

## 1.22 Infiltración y recarga de lluvia

Es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de la superficie de la tierra. Parte del recurso hídrico suele quedar retenido por el suelo y la otra parte, alcanza la zona saturada (nivel freático) del sistema acuífero. Esta última se le conoce como agua gravífica, percolación profunda, infiltración eficaz o infiltración profunda.

Puesto que en la estimación de la recarga total, es difícil encontrar los porcentajes de agua que pueden provenir de la recarga natural vertical, la inducida (retornos agrícolas) y la artificial; se propone el procedimiento que se describe a continuación.

Para la determinación de esta variable, el procedimiento sugerido a aplicar es considerar, el valor de la precipitación promedio anual para la zona

en Jujutla que conforma el acuífero, establecido para el balance del agua superficial. Se debe de determinar, en área y porcentaje, los tipos de suelo ya que se debe identificar la textura, la estructura, el contenido en materia orgánica y la capacidad que tiene para infiltrar el agua por unidad de tiempo; es posible estimar un porcentaje del agua de lluvia que se infiltra en el suelo y la recarga natural del sistema pétreo de la zona, en tabla 1.24 [5], se enlistan algunos valores de porosidad, que en la zona es pliestoceno.

**Tabla 1.24.** Valores de porosidad eficaz de algunas rocas

Roca	Porosidad Eficaz (%)
Tipo	
Cuaternario aluvión	35
Cuaternario lacustre	03
Cuaternario inferior volcánico	30
Cuaternario inferior cono volcánico	30
Cuaternario- Plietoceno andesíta	15
Cuaternario volcánico	35
Cuaternario cono volcánico	35

Fuente: Davis y De Wiest, 1971; Ingebritsen y Sanford, 1998.

#### *Retornos de la demanda*

El retorno de la demanda es el porcentaje de agua que es devuelta al área de análisis (microcuenca) y que no representa un uso consuntivo por parte de alguno de los usuarios, tales como la hidroelectricidad, las pérdidas de agua de los sistemas de abastecimiento de agua (tuberías), la devolución que se hace al final de un sistema de riego, entre otros. Estos retornos representan una entrada al modelo del Balance Hídrico, y para el caso el 99 % del caudal turbinado será devuelto al cauce del río.

#### *Importaciones superficiales de otra cuenca*

En el modelo de Balance Hídrico, se considera el aporte de las aguas superficiales que son llevadas como trasvase desde otro sitio (cuenca, lago, embalse, etc.) hacia la microcuenca copinula, podemos asegurar que no

existen importaciones superficiales de otras cuencas, aunque si lo hay subterráneamente.

### 1.23 Cambio de Almacenamiento

El cambio de almacenamiento representa el flujo subsuperficial que se genera en las cuencas, la recarga a los acuíferos y las variaciones de los cuerpos de agua.

Como resultado de la aplicación de la ecuación de conservación de masa, se obtuvieron las cantidades de almacenamiento de agua las cuales se traducen en recargas, flujo subterráneo y cambios de nivel en cuerpos de agua, a nivel mensual y anual en la zona de las caídas de agua, en la figura 1.48, mapa global del país, se enmarca el lugar y como se visualiza, está ubicado en la zona azul o donde el cambio de almacenamiento es bastante positivo, asegurando el cauce del río durante todo el año.

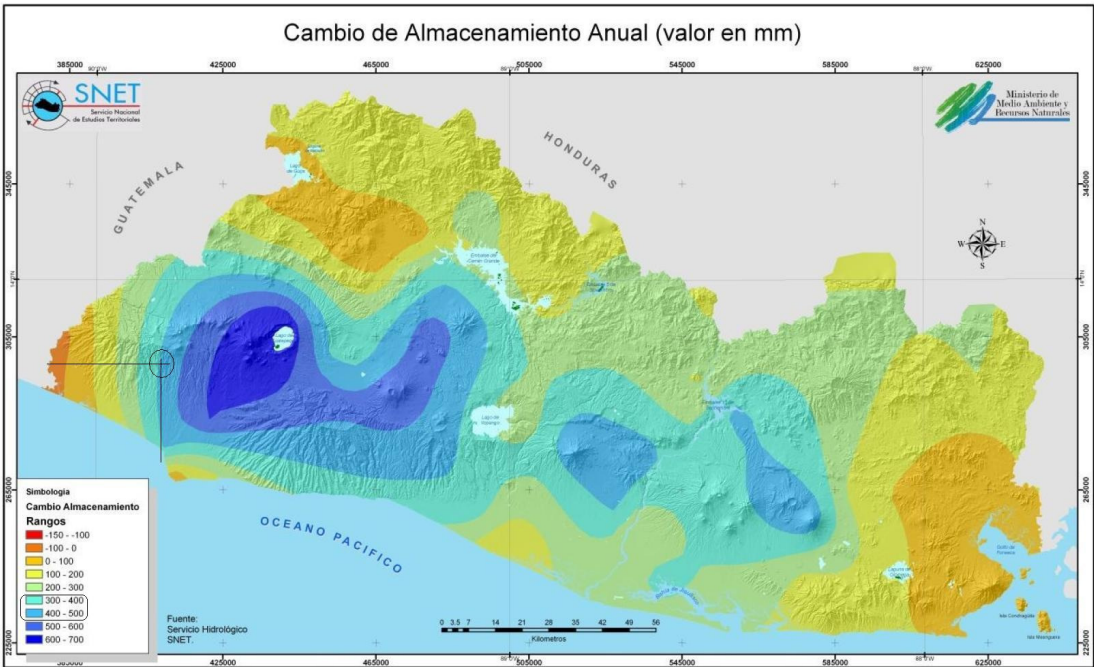


Figura 1.48. Cambio de almacenamiento regional, donde está indicado la micro cuenca Copinula; el cambio de almacenamiento es entre 300 a 500 mm. [10]

## **CAPÍTULO II. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL HIDRÁULICO EN EL RÍO COPINULA.**

### **2.1 Generalidades sobre las centrales hidráulicas.**

Al realizar un estudio del potencial hidráulico que posee un río en particular, es importante mencionar que en términos de ingeniería se debe considerar dicho potencial con respecto a la energía cinética relacionada con el movimiento del agua y a la energía potencial que depende de la altura a la cual, el agua está disponible, ésta última altura se le conoce como salto.

Actualmente, entre los muchos usos que se le da a la energía hidráulica se encuentra la generación de electricidad, tomando como base, los caudales de los ríos, en los cuales se hacen obras civiles para aprovechar al máximo el potencial disponible, entre las obras de este tipo más comunes, se encuentran los diques y las tuberías que dirigen el flujo de agua hacia la casa de máquinas, en donde se encuentran las turbinas y los generadores eléctricos. A lo largo del mundo existen instalaciones de este tipo, sin embargo dichas instalaciones varían de acuerdo a una clasificación que se basa principalmente en términos de la altura o salto, de la capacidad de generación, tipo de obra civil o del tipo de tecnología utilizada.

Dentro de las centrales hidráulicas, las que se consideran mini centrales, son muy importantes en el desarrollo de los países ya que se requiere de una inversión menor a la que se requiere para aquellas de mayor capacidad, además, las mini centrales presentan un menor impacto ambiental, lo que en la actualidad es muy importante considerar.

Cabe mencionar, que no existe una clasificación unificada en todo el mundo sobre las centrales hidroeléctricas, por lo que es necesario tomar de referencia a organizaciones regionales que poseen vasta experiencia en el desarrollo de este tipo de instalaciones, en la Tabla 2.1 se presenta la clasificación para el caso de los países latinoamericanos.

**Tabla 2.1** Capacidad de generación para diferentes tipos de instalaciones (OLADE)<sup>1</sup>.

TIPO DE INSTALACIÓN	CAPACIDAD MÁXIMA (kW)
Pequeñas centrales	500 – 5.000
Mini centrales	50 – 500
Micro centrales	< 50

Además de la capacidad de generación, se puede hacer una clasificación con base a las características que posee la instalación de las centrales para la producción de electricidad, las cuales pueden ser principalmente de los siguientes tipos:

**a) De agua fluyente:** En este tipo de instalación, no se regula el caudal de agua que se dirige hacia la turbina, el funcionamiento de este tipo de central, se basa principalmente en que la turbina que acciona al generador, está en operación siempre y cuando, por dicha turbina circule un caudal mínimo de operación, si el caudal no es lo suficiente, se detiene la operación del grupo turbina generador, este tipo de infraestructura requiere menos inversión en lo referente a obras civiles.

**b) De pie de presa:** Con estas instalaciones, es necesario la construcción de un embalse que permita el almacenamiento de un porcentaje de agua del río, con lo que se regula el caudal que se desea desviar hacia las turbinas, este tipo de infraestructura posee la ventaja de que se tiene control de cuándo se puede realizar la generación eléctrica de acuerdo a las necesidades que se desean cubrir.

---

<sup>1</sup> OLADE: Organización Latinoamericana de Energía

## 2.2 Cómo se origina la energía hidráulica

La energía hidráulica tiene su origen como consecuencia del ciclo hidrológico en el cual, el Sol posee gran importancia pues él contribuye al inicio y continuidad de este ciclo, éste último, comienza cuando el Sol calienta la superficie terrestre evaporando el agua contenida en las grandes extensiones de agua como los océanos y lagos, este calentamiento produce el vapor que se transporta a las grandes masas continentales por medio de los vientos y las condiciones atmosféricas, luego, el vapor se condensa y forma las nubes, las cuales a su vez, provocan precipitaciones o lluvias, las cuales se encargan de alimentar e incrementar los caudales de los ríos presentes en diferentes zonas de los países, este ciclo, se muestra en la Figura 2.1.

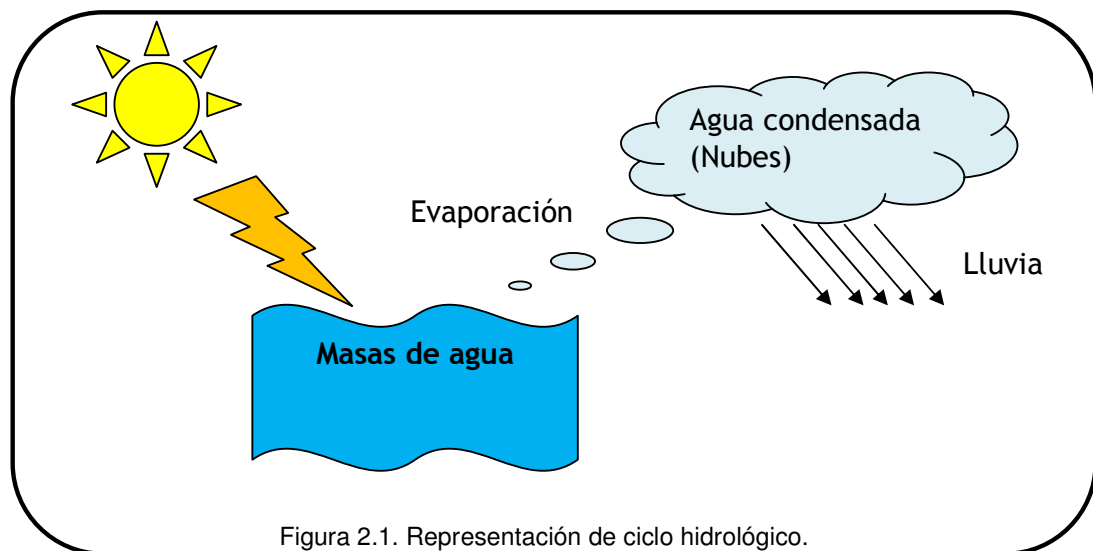


Figura 2.1. Representación de ciclo hidrológico.

Es precisamente en estos ríos en los que cae la lluvia, que cobra importancia la energía hidráulica ya que, es en los mismos, en donde se construyen las centrales para aprovechar el recurso energético hidráulico para convertirlo en electricidad, mediante la desviación de parte del caudal original para efectos de dirigirlo hacia las turbinas, una vez, el caudal desviado ha pasado por las turbinas de la central, éste se incorpora al caudal original y finalmente el río desemboca en lagos o en mares que forman parte de los

océanos a los cuales el sol volverá a calentar y el ciclo se repite una vez más de manera continua.

## **2.3 Potencial de la energía hidráulica en El Salvador.**

En El Salvador se consideran dos estaciones durante el año, la seca y la lluviosa, ésta última se caracteriza por precipitaciones desde leves a fuertes, las cuales duran un aproximado de seis meses entre Mayo a Octubre (ver tabla 1.3). Por lo que durante estos meses del año, se considera que el potencial hidráulico que se puede explotar es alto, y la generación de energía eléctrica con base a este tipo de centrales cobra una marcada importancia. El Salvador posee accidentes geográficos que, junto con los ríos, contribuyen a que se explote este tipo de energía, ya que se cuenta con elevaciones de terrenos que favorecen la creación de saltos de agua que permiten obtener un alto grado de aprovechamiento de la energía potencial del agua con esas alturas.

En El salvador, durante los meses de Abril y Mayo se presentan las primeras lluvias, las cuales marcan la transición de la época seca a la época lluviosa, específicamente, en la zona geográfica de interés, las cantidades de lluvia son del orden de los 10 a 20 mm en la franja central y costera occidental incrementándose para el mes de abril a cantidades de 20 y 30 mm hasta 40 y 50 mm en forma más generalizada<sup>2</sup>.

El municipio de Jujutla, departamento de Ahuachapán, de acuerdo a registros históricos del Plan Maestro de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos (PLAMDARH, 1981), se considera perteneciente a la Región C y se cataloga como zona de máxima precipitación<sup>3</sup>.

Es importante mencionar que, si bien es cierto el potencial hidráulico está presente en la mayoría de las regiones de un país como El Salvador, no todo ese potencial puede aprovecharse ya que, hay lugares en los que el agua

---

<sup>2</sup> Tomado de fuente de consulta 5.

<sup>3</sup> Tomado de fuente de consulta 18.

de los ríos está en ubicaciones en las cuales el acceso se vuelve muy difícil y por ende su aprovechamiento también, motivo por el cual, es necesario identificar posibles lugares de interés y considerar el término de caudal medio de los ríos para estimar el potencial hidráulico.

## **2.4 Medida del potencial hidráulico para un río**

En términos de electricidad, lo más importante es, relacionar el potencial hidráulico con la potencia eléctrica en *watts*, que puede obtenerse de dicho potencial. La potencia que se puede obtener del recurso hidráulico se estima utilizando la siguiente ecuación:

$$P = \rho gQH \qquad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde, " $\rho$ " es la densidad del agua y para efecto de cálculo se toma como  $1000 \text{ kg/m}^3$ , " $g$ " representa la aceleración de la gravedad con un valor de  $9.8 \text{ m/s}^2$ , " $Q$ " representa el caudal de agua en  $\text{m}^3/\text{s}$  que se desvía hacia las turbinas y " $H$ " es la altura o distancia medida entre la parte alta y la parte baja de una cascada del río, esta distancia es conocida también como salto bruto y se expresa en metros. Por lo que si se desea estimar la potencia eléctrica es necesario que se determinen el caudal y el salto bruto, por lo que a continuación se muestra la metodología empleada para estimar el caudal y el salto del Río Copinula para estimar la potencia eléctrica que se puede obtener de dicho río.

## **2.5 Medida del caudal en el río Copinula.**

Para estimar los caudales promedios en la zona geográfica en la cual se pretende instalar la central, es necesario obtener información de estaciones meteorológicas instaladas idealmente en la zona, tomar datos de la estación más cercana al sitio de la posible instalación o, si es factible, realizar

mediciones en el sitio. Entre los datos que son de mayor importancia, se encuentran los caudales instantáneos máximos y los promedios en un día los cuales, dependen principalmente de las precipitaciones que se dan en la zona de interés, para lo cual se cuenta con una serie de datos y mapas que proporcionan una visión del comportamiento climatológico de la zona.

En el caso de la realización de las mediciones in situ, lo que se hizo fue medir la velocidad de la corriente de agua y el área de la sección transversal que dicha corriente corta, luego, el caudal se determinó empleando la siguiente ecuación:

$$Q = vA \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde “v” representa la velocidad de la corriente de agua en m/s y “A” se refiere al área de sección transversal en m<sup>2</sup> que atraviesa dicha corriente.

Un método empleado para determinar el área “A” de sección transversal, consistió en subdividir el área transversal total del río en el punto de medición en varias áreas más pequeñas, para lo cual, en la parte superior se divide el ancho del río de manera equidistante y a cada una de esas distancias se toma la profundidad del río denominándoles a dichas profundidades ( $h_1$ ,  $h_2$  hasta  $h_n$ ), como se muestra en la figura 2.2 y 2.3.

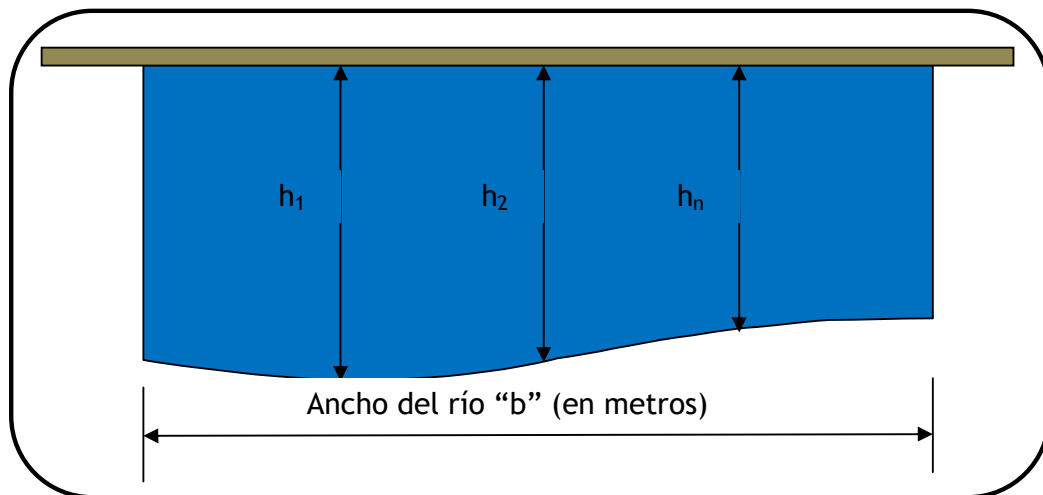


Figura 2.2. Método para la determinación del área transversal.

En este proyecto, se escogieron dos puntos de interés en el del Río Copinula para estimar el caudal. A continuación se muestran las fotos, datos y resultados obtenidos para dichos puntos de interés.

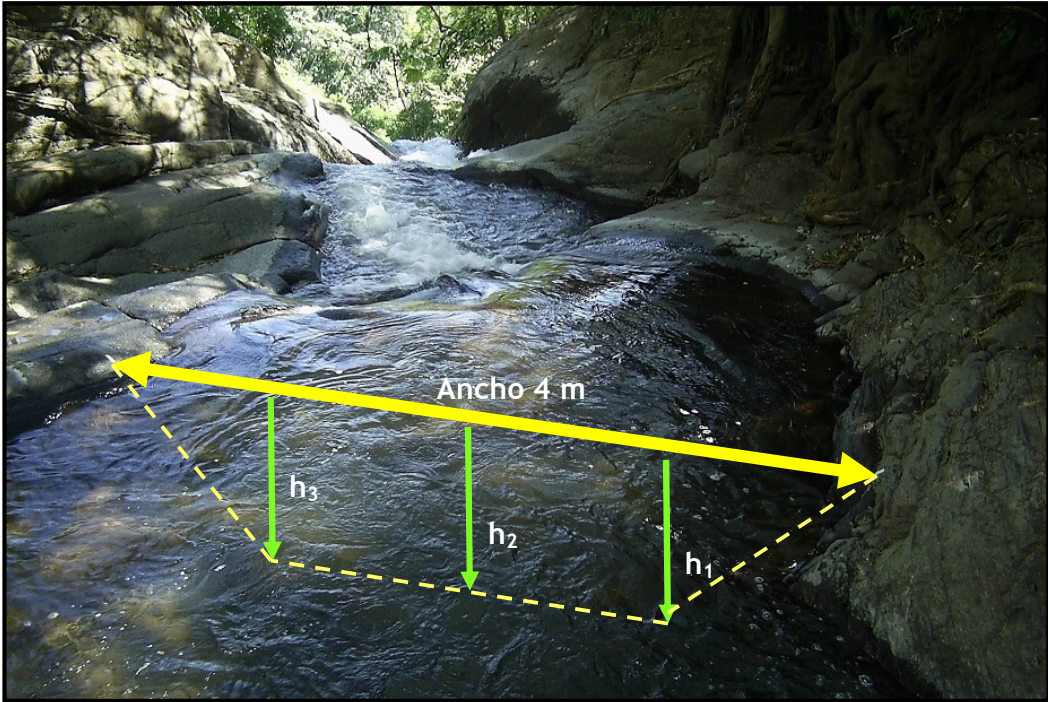


Figura 2.3. Determinación de área en el punto 1, ubicado en lugar conocido como “Los Encuentros” sobre el cauce del Río Copinula.

Una vez se realizan las mediciones del procedimiento anterior, se procede a calcular el área con la ecuación 3.

$$A = b \frac{h_1+h_2+h_3+\dots+h_n}{n} \qquad \text{Ecuación 2.3}$$

Para el caso del punto 1, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Datos en río Copinula para determinar Área de punto 1 de interés.

Parámetro	Medición en cm
Ancho de río (b)	400
Profundidad 1 (h1)	34
Profundidad 2 (h2)	24
Profundidad 3 (h3)	70

Por lo tanto, el área aproximada para este primer punto se determina a continuación.

$$Area\_punto\_1 = 4 * \frac{0.34 + 0.24 + 0.7}{3} = 1.70 m^2$$

En la figura 2.4 se muestra el segundo punto de interés, para el cual se requiere determinar el área.

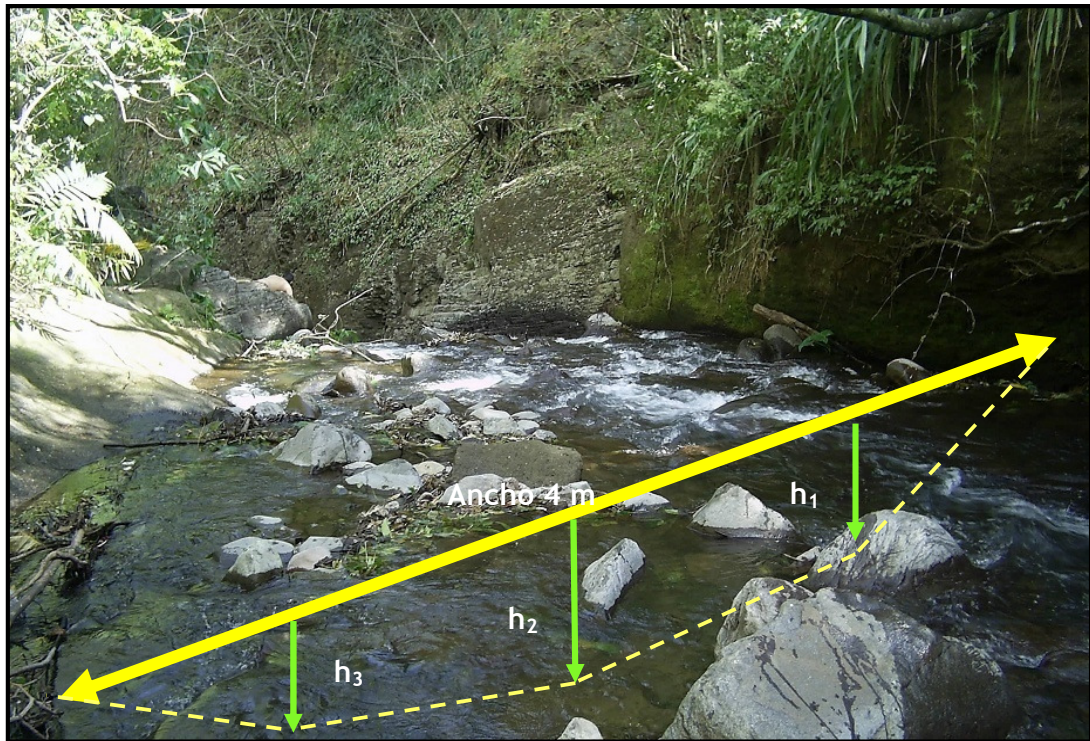


Figura 2.4. Determinación de área en el punto 2, ubicado en lugar conocido como "El Salto".

En el punto 2, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Datos de mediciones, en río Copinula para determinar área de punto 2 de interés.

Parámetro	Medición en cm
Ancho de río (b)	400
Profundidad 1 (h <sub>1</sub> )	32
Profundidad 2 (h <sub>2</sub> )	28
Profundidad 3 (h <sub>3</sub> )	21

Para este segundo punto, el área aproximada es:

$$Area_{punto_2} = 4 * \frac{0.32 + 0.28 + 0.21}{3} = 1.08 m^2$$

Una vez se tiene el área, el único parámetro desconocido para determinar el caudal en ambos puntos, es la velocidad; para determinar esta última lo que se hizo es obtener una velocidad promedio del agua, esta medición se hizo empleando un molinete como el de la figura 2.5, el cual, se utiliza para medir la velocidad de la corriente de agua en varios puntos de una misma sección transversal del río y a diferentes profundidades.

Dado que lo importante son mediciones puntuales, se suelen utilizar molinetes provistos con hélices que transmiten un impulso eléctrico a un contador por cada vuelta de la hélice. En la figura 2.5, se muestra el molinete que se utilizó para medir la velocidad en el Río Copinula del municipio de Jujutla, departamento de Ahuchapán.

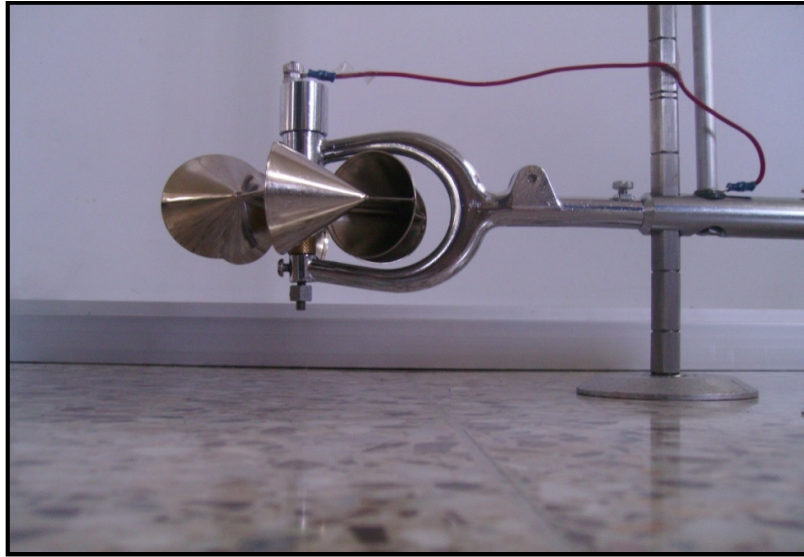


Figura 2.5. Molinete utilizado para medir velocidad en Río Copinula<sup>4</sup>.

En la figura 2.6, muestra la técnica utilizada para realizar las mediciones de velocidad en diferentes puntos del río y a distintas profundidades.



Figura 2.6. Medición de velocidad en punto 1 (Los Encuentros) de Río Copinula.

<sup>4</sup> Fotografía gracias a la Sala Científica Estadounidense para la investigación en Energía. Universidad Don Bosco.

Las mediciones realizadas, como se muestra en la figura 2.6, implica contar los pulsos eléctricos, asociados a las revoluciones del molinete en los puntos de interés, en un determinado período de tiempo, para este proyecto se utilizó un tiempo de 60 s, los datos promedios se presentan en la Tabla 2.4 y Tabla 2.5.

**Tabla 2.4.** Revoluciones de molinete para primer punto de interés, en el lugar conocido como “los Encuentros”.

Profundidad (cm)	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	Promedio
34	25	28	26	29	29	27.4
24	31	30	30	32	31	30.8
70	12	13	18	13	15	14.2

**Tabla 2.5.** Revoluciones de molinete para segundo punto de interés, en el lugar conocido como “el Salto”.

Profundidad (cm)	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	Promedio
32	40	40	40	36	41	39.4
28	41	43	44	45	40	42.6
21	41	43	40	42	39	41

Con los datos de las Tablas 2.4 y 2.5, se procede a determinar la velocidad en m/s a partir de una tabla proporcionada por el fabricante del equipo<sup>5</sup>, la cual se presenta en la Tabla 2.6; se ha remarcado la franja de tiempo que se ha utilizado en nuestro proyecto, es decir los 60 segundos. Además en el caso de que el número de revoluciones no coincida exactamente con los datos mostrados en la tabla, se ha tomado la velocidad que corresponde a las revoluciones más cercanas y si este número de revoluciones

<sup>5</sup> Tabla por cortesía de Rickly Hidrological Co. Columbus. Ohio

se encuentra en un punto intermedio, se ha tomado la inferior más cercana a las promedio que se muestran en las tablas 2.4 y 2.5. Es así, como por ejemplo para el valor promedio de 27.4, se ha tomado como de 25 revoluciones, esto base al criterio de hacer una estimación conservadora.

Tabla 2.6 Variables para establecer velocidad con base a mediciones realizadas con molinete.

<b>METRIC STANDARD RATING TABLE NO. 2 FOR AA CURRENT METERS (6/99) - VELOCITY IN METERS PER SECOND</b>																		
<b>TIME IN SECS</b>	<b>REVOLUTIONS</b>																	
	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>300</b>	<b>350</b>
40	0.056	0.089	0.123	0.173	0.257	0.341	0.425	0.509	0.677	0.845	1.013	1.349	1.685	2.526	3.366	4.206	5.046	5.886
41	0.055	0.087	0.120	0.169	0.251	0.333	0.415	0.497	0.661	0.825	0.989	1.317	1.645	2.464	3.284	4.103	4.923	5.742
42	0.053	0.085	0.117	0.165	0.245	0.325	0.405	0.485	0.645	0.805	0.965	1.285	1.605	2.406	3.206	4.006	4.806	5.606
43	0.052	0.084	0.115	0.162	0.240	0.318	0.396	0.474	0.631	0.787	0.943	1.256	1.568	2.350	3.131	3.913	4.694	5.475
44	0.051	0.082	0.112	0.158	0.235	0.311	0.387	0.464	0.616	0.769	0.922	1.227	1.533	2.296	3.060	3.824	4.587	5.351
45	0.050	0.080	0.110	0.155	0.229	0.304	0.379	0.453	0.603	0.752	0.901	1.200	1.499	2.246	2.992	3.739	4.486	5.232
46	0.049	0.078	0.108	0.152	0.225	0.298	0.371	0.444	0.590	0.736	0.882	1.174	1.466	2.197	2.927	3.658	4.388	5.119
47	0.048	0.077	0.106	0.148	0.220	0.291	0.363	0.434	0.577	0.720	0.863	1.149	1.435	2.150	2.865	3.580	4.295	5.010
48	0.047	0.075	0.103	0.145	0.215	0.285	0.355	0.425	0.565	0.705	0.845	1.125	1.405	2.105	2.806	3.506	4.206	4.906
49	0.047	0.074	0.101	0.143	0.211	0.280	0.348	0.417	0.554	0.691	0.828	1.103	1.377	2.063	2.748	3.434	4.120	4.806
50	0.046	0.073	0.100	0.140	0.207	0.274	0.341	0.409	0.543	0.677	0.812	1.081	1.349	2.021	2.694	3.366	4.038	4.710
51	0.045	0.071	0.098	0.137	0.203	0.269	0.335	0.401	0.533	0.664	0.796	1.060	1.323	1.982	2.641	3.300	3.959	4.617
52	0.044	0.070	0.096	0.135	0.199	0.264	0.329	0.393	0.522	0.652	0.781	1.039	1.298	1.944	2.590	3.236	3.882	4.529
53	0.043	0.069	0.094	0.132	0.196	0.259	0.322	0.386	0.513	0.639	0.766	1.020	1.273	1.907	2.541	3.175	3.809	4.443
54	0.043	0.068	0.093	0.130	0.192	0.254	0.317	0.379	0.503	0.628	0.752	1.001	1.250	1.872	2.494	3.117	3.739	4.361
55	0.042	0.067	0.091	0.128	0.189	0.250	0.311	0.372	0.494	0.616	0.739	0.983	1.227	1.838	2.449	3.060	3.671	4.282
56	0.041	0.065	0.089	0.125	0.185	0.245	0.305	0.365	0.485	0.605	0.725	0.965	1.205	1.805	2.406	3.006	3.606	4.206
57	0.041	0.064	0.088	0.123	0.182	0.241	0.300	0.359	0.477	0.595	0.713	0.949	1.184	1.774	2.363	2.953	3.542	4.132
58	0.040	0.063	0.087	0.121	0.179	0.237	0.295	0.353	0.469	0.585	0.701	0.932	1.164	1.743	2.323	2.902	3.481	4.061
59	0.040	0.062	0.085	0.119	0.176	0.233	0.290	0.347	0.461	0.575	0.689	0.917	1.144	1.714	2.283	2.853	3.422	3.992
60	0.039	0.061	0.084	0.117	0.173	0.229	0.285	0.341	0.453	0.565	0.677	0.901	1.125	1.685	2.246	2.806	3.366	3.926
61	0.038	0.061	0.083	0.116	0.171	0.226	0.281	0.336	0.446	0.556	0.666	0.887	1.107	1.658	2.209	2.760	3.310	3.861
62	0.038	0.060	0.081	0.114	0.168	0.222	0.276	0.331	0.439	0.547	0.656	0.873	1.089	1.631	2.173	2.715	3.257	3.799
63	0.037	0.059	0.080	0.112	0.165	0.219	0.272	0.325	0.432	0.539	0.645	0.859	1.072	1.605	2.139	2.672	3.206	3.739
64	0.037	0.058	0.079	0.110	0.163	0.215	0.268	0.320	0.425	0.530	0.635	0.845	1.055	1.580	2.105	2.631	3.156	3.681
65	0.036	0.057	0.078	0.109	0.161	0.212	0.264	0.316	0.419	0.522	0.626	0.833	1.039	1.556	2.073	2.590	3.107	3.624
66	0.036	0.056	0.077	0.107	0.158	0.209	0.260	0.311	0.413	0.515	0.616	0.820	1.024	1.533	2.042	2.551	3.060	3.569
67	0.036	0.056	0.076	0.106	0.156	0.206	0.256	0.306	0.407	0.507	0.607	0.808	1.008	1.510	2.011	2.513	3.014	3.516
68	0.035	0.055	0.075	0.104	0.154	0.203	0.252	0.302	0.401	0.500	0.598	0.796	0.994	1.488	1.982	2.476	2.970	3.464
69	0.035	0.054	0.074	0.103	0.152	0.200	0.249	0.298	0.395	0.492	0.590	0.785	0.979	1.466	1.953	2.440	2.927	3.414
70	0.034	0.053	0.073	0.101	0.149	0.197	0.245	0.293	0.389	0.485	0.581	0.773	0.965	1.445	1.925	2.406	2.886	3.366

Con base a los criterios explicados en el párrafo anterior, los resultados promedios obtenidos se muestran en la Tabla 2.7.

**Tabla 2.7.** Velocidades medidas en el río Copinula

Parámetro	Velocidad en punto 1 (m/s)	Velocidad en punto 2 (m/s)
Profundidad 1	0.285	0.453
Profundidad 2	0.341	0.453
Profundidad 3	0.173	0.453
Valores promedio	<b>0.266</b>	<b>0.453</b>

En la Tabla 2.7, el punto 2 (El salto) es el que ofrece las mejores velocidades promedios. Sin embargo, la velocidad no es el único parámetro del río que interesa evaluar, aunque ella sólo es un parámetro para determinar el caudal que pasa por los diferentes puntos, este caudal como se expresa en la ecuación 2.2, depende del área que atraviesa la corriente agua, por lo que, para tomar una decisión del punto de mayor interés, es necesario calcular los caudales en ambos puntos:

$$Q_{en_{punto_1}} = vA = 0.266 \text{ m/s} * 1.7 \text{ m}^3 = 0.452 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{en_{punto_2}} = vA = 0.453 \text{ m/s} * 1.08 \text{ m}^3 = 0.489 \text{ m}^3/\text{s}$$

Estos caudales, son los que se han calculado con base a mediciones de área y velocidades promedios realizadas en los sitios de interés. Se realizaron mediciones en el punto de ubicación de la obra de toma durante los meses de Septiembre y en el mes de Diciembre con el propósito de tener muestras de meses de la época húmeda y la época seca. Además de las mediciones realizadas, se cuenta con información de caudales promedios mensuales del Río Copinula durante 17 años (Figura 1.38, 1959 a 1976). Los valores medidos no se pueden considerar como definitivos, sino valores representativos, que al compararlos con los promedios históricos de este río, el cual ronda los 0.65 m<sup>3</sup>/s, son similares.<sup>6</sup>

---

6 Datos con base a información ver proyecto: "Manejo Integrado de cuencas asociadas al complejo hidrográfico Barra

El mayor caudal medido por los investigadores y personal del lugar, fue de 0.489 m<sup>3</sup>/s correspondiente al punto 2, y es precisamente este caudal el que se toma para calcular la potencia en *watts* que se puede obtener, es importante mencionar que la mayoría de los obstáculos que aparecen reflejados en este punto de interés (Ver figura 2.4) son fácilmente removibles para mejorar las condiciones del lugar en términos de aprovecha el potencial hidráulico de río.

No todo el caudal de 0.489 m<sup>3</sup>/s se va a destinar para que pase a las turbinas, es necesario considerar no interferir con el ecosistema del lugar, por lo que es imprescindible determinar el porcentaje de caudal que se desviará para utilizarlo en las turbinas ubicadas en la casa de máquinas y el respectivo caudal ecológico.

El caudal ecológico, consiste en la reserva de agua que deberá mantenerse en todo cauce natural de aguas superficiales, corrientes o detenidas, no agotado, en la cantidad necesaria para permitir la subsistencia de la vida animal y vegetal que le son naturalmente propias, incluyendo la necesaria para el mantenimiento de humedades y ecosistemas estuarianos<sup>7</sup>.

Existen varios métodos para calcular el caudal ecológico o caudal ambiental, sin embargo por los escasos datos que se poseen para el Rio Copinula, se opta trabajar en este documento con el Método CEMAGREF<sup>8</sup>, el cual fue desarrollado en Francia y sugiere un valor de caudal ecológico que varíe del 2.5% al 10% del flujo medio mensual. La fórmula que se utiliza es:

$$Q_{ecologico\_mensual} = ((0.0651 * QMM + 2)/100) * QMA \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:        QMM es el caudal medio mensual  
                  QMA Caudal medio anual

Sin embargo, para trabajar la fórmula CEMAGREF, el valor que se utilizará para QMM es el caudal mínimo del que se tiene registro según la Tabla

---

<sup>7</sup> Definición obtenida de "Programa Salvadoreño de Investigación Sobre Desarrollo y Medio Ambiente (PRISMA). 2001  
<sup>8</sup> Para mayores detalles, ver documento: "Patridn Hidropower Project". *Environmental Impact Assessment. Star Hidropower LTD. June 2010.*

1.18, es decir, 0.5532 para el mes de Marzo, el cual, se considera un mes perteneciente a la época de transición de seca a lluviosa, lo que permite hacer consideraciones muy prudentes en cuanto a los diferentes tipos de caudales. Mientras que para el valor de Caudal Anual Medio (QAM) se utilizará el valor promedio de los caudales mensuales presentes en la misma tabla, siendo el promedio de 1.5327 m<sup>3</sup>/s. A partir de los datos de caudal, obtenidos bajo la regionalización de caudales de la cuenca en la región C, y presentados en el Capítulo I<sup>9</sup>, se muestra a continuación la gráfica de caudales mensuales en río Copinula.

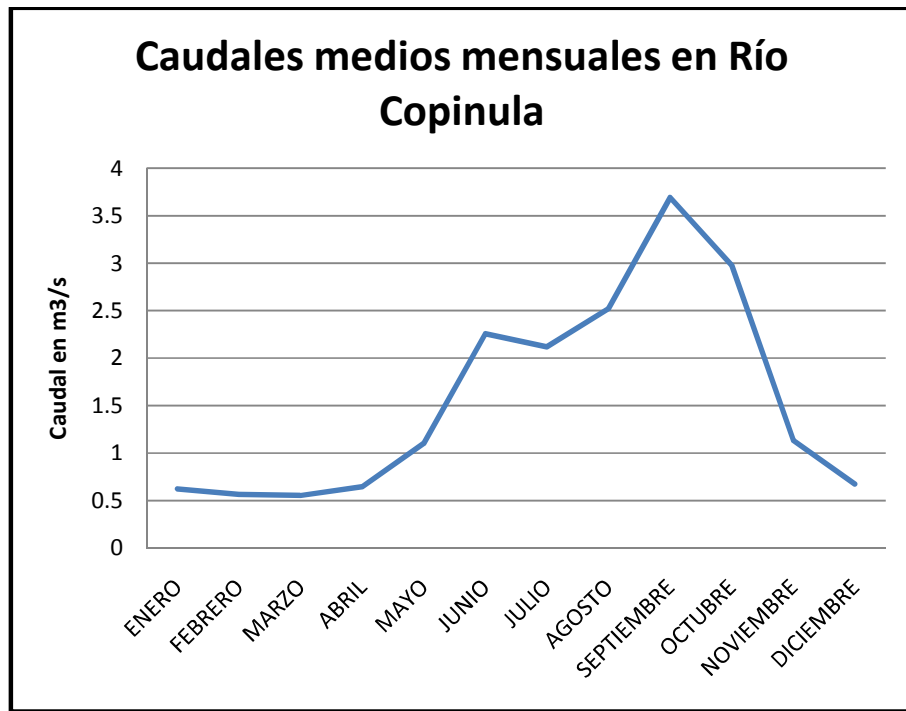


Figura 2.7. Caudales medios mensuales aguas arriba de los saltos de agua en Río Copinula, tomado de datos obtenidos en tabla 1.18

El caudal medio mensual es de aproximadamente 1.5717 m<sup>3</sup>/s.

<sup>9</sup> Ver Capítulo I. Tabla 1.18.

Teniendo estos valores, y aplicando la fórmula que establece el método CEMAGREF, el caudal ecológico mensual para el Río Copinula sería:

$$Q_{ecologico_{mensual}} = \left( \frac{0.0651 * 0.5532 + 2}{100} \right) * 1.5717 = 0.032 \frac{m^3}{s}$$

Tomando como base el mes con el menor caudal correspondiente a 0.5532, el porcentaje de caudal ecológico con respecto al caudal mensual sería:

$$\%Q_{ecologico_{mensual}} = \left( \frac{0.032}{1.5717} \right) * 100\% = 2.03 \%$$

Este porcentaje de caudal ecológico se encuentra abajo del rango que maneja el método CEMAGREF, es decir entre el 2.5% y el 10%. Por lo que si se requiere tener una idea del caudal ecológico mensual que debería tenerse para el Río Copinula sería como porcentaje menor, un 2.5% del caudal medio mensual mínimo. Sin embargo, se puede trabajar con los datos promedios medidos en el sitio para tener una idea de cuánto sería el caudal ecológico que debe establecerse para el Río Copinula o tomar mediciones hechas durante varios meses, para lo cual, retomando los datos de la Tabla 1.18 de la que se obtiene un caudal medio mensual de 1.5717 m<sup>3</sup>/s, por lo que, el caudal ecológico sería:

$$Q_{ecologico} = \left( 1.5717 \frac{m^3}{s} \right) * .025 = 0.039 \frac{m^3}{s}$$

Si al caudal promedio de 1.5717 m<sup>3</sup>/s se le resta el caudal ecológico, contaríamos con un caudal para destinar hacia las turbinas de:

$$Q_{turbinas} = \left( 1.5717 \frac{m^3}{s} \right) - \left( 0.039 \frac{m^3}{s} \right) = 1.5327 \frac{m^3}{s}$$

El caudal destinado para desviar a las turbinas es de 1.5327 m<sup>3</sup>/s.

En último parámetro de interés para determinar el potencial hidráulico que se puede obtener del Río Copinula es el salto, el cual se considera a continuación.

## 2.6 Medida del salto bruto en el Río Copinula

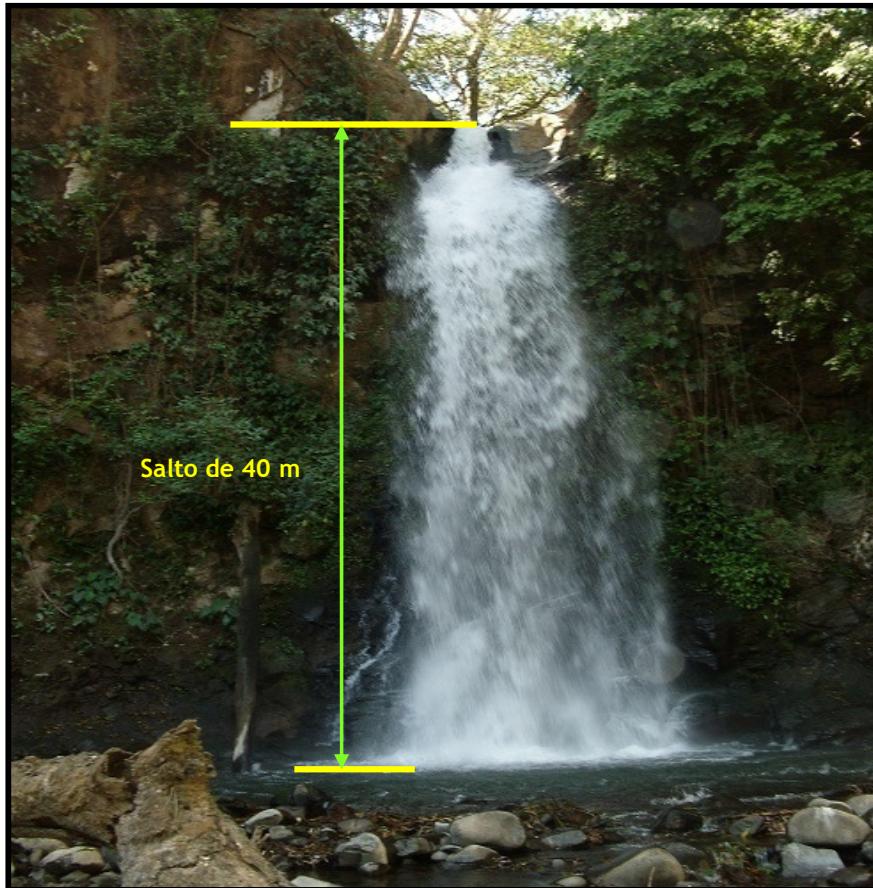


Figura 2.8. Salto en el Río Copinula, En el lugar conocido como El Salto.

Como se ha mencionado, para la estimación del potencial hidráulico que posee un río, es de suma importancia también, determinar el salto bruto, el cual se establece como la distancia vertical que existe entre el punto más alto de la cascada y el punto más bajo de la misma, dicha distancia se representa con la letra H y se expresa en metros. La medición de este parámetro se puede hacer de varias formas, una de las cuales consiste en realizar la medición utilizando un teodolito electrónico, sin embargo en el caso de los saltos del Río Copinula, la medición se realizó con cintas métricas de 50 metros. En las figuras 2.8 y 2.9, se muestra los saltos de interés que posee el Río Copinula.



Figura 2.9. Doble salto en el Río Copinula, En el lugar conocido como Los Encuentros, la altura medida fue de 42 metros aproximadamente.

Con estos datos, se puede estimar entonces la potencia teórica disponible que se obtendría del Río Copinula con base a los datos medidos y obtenidos de fuentes como el SNET. Para ello, retomamos la Ecuación 2.1, evaluando para la altura de 40 m para obtener un resultado de la potencia teórica que se puede obtener en uno de los dos puntos de interés.

$$P = \rho gQH = 1000 \frac{kg}{m^3} * 9.8 \frac{m}{s^2} * 1.5327 \frac{m^3}{s} * 40m$$

$$P = 600818.4 W = 600 kW_e$$

Este dato de potencia sería una primera aproximación de la potencia eléctrica que se puede generar en este río, sin embargo, es importante recordar que, se deben considerar datos históricos del comportamiento de fenómenos de interés que suceden en el lugar geográfico en donde se ubica el río, por ejemplo es de suma importancia contar con datos de precipitaciones, caudales máximos y medios; los cuales, son la base del cálculo estadístico que permite estimar de manera más objetiva el aprovechamiento energético que es posible obtener y considerar además, pérdidas en dispositivos y eficiencias de las máquinas a utilizar.

## **2.7 Tipos de centrales hidráulicas más utilizadas.**

Una vez se tiene los principales datos relacionados con caudales, salto y potencia eléctrica a generar, llega el momento de decidir qué tipo de central es la más conveniente de acuerdo a las condiciones y datos recabados, para ello, existen diferentes tipos de centrales hidráulicas, los cuales se aplican de acuerdo a las características propias del lugar geográfico en donde se encuentra el recurso que se pretende explotar. Sin embargo en términos generales, esta clasificación depende principalmente de la altura del salto que se posee. En el caso particular el salto con el que se cuenta en el Rio Copinula es entre 40 a 55 m, por lo que se le cataloga como salto mediano.

Otra clasificación que se le hace a las centrales hidráulicas para la producción de electricidad es en cuanto a la obra civil y las instalaciones hidráulicas que poseen, es así como se pueden encontrar dos principales tipos de centrales:

- a) **De agua fluyente.** Este tipo de centrales se caracteriza por tomar una parte del caudal del río para dirigirlo hacia las turbinas que conectadas a los generadores eléctricos producirán la energía eléctrica deseada. El principio de operación de este tipo de central se basa en dejar pasar el

caudal principal del río en la parte alta del salto para que continúe con su recorrido natural y derivar, siempre en la parte alta del salto, una parte la cual es conducida por medio de un canal artificial de derivación hasta la cámara de carga desde la cual, el agua se conducirá a la central por medio de tubería forzada desde la parte alta del salto a una parte más baja en donde se encuentra la casa de máquinas que aloja al conjunto turbina – generador, con esto se logra aprovechar la energía potencial, por lo que es necesario lograr que la tubería posea la máxima pendiente que permita las condiciones del lugar para aprovechar al máximo dicha energía; luego de pasar por estas máquinas, el agua utilizada en la generación de electricidad se reincorpora al caudal principal del río por medio de un canal de desagüe para continuar con su recorrido natural. Este tipo de central, se caracteriza por proporcionar electricidad de acuerdo al caudal que circula por el río, en este sentido es importante establecer, un caudal mínimo de operación para garantizar la producción de electricidad, este caudal mínimo recibe el nombre de caudal mínimo técnico.

En la figura 2.10, se muestra una instalación de la tubería forzada y al fondo, la casa de máquinas. Para el caso particular del Río Copinula, este sería el tipo de central más conveniente.

- b) **De embalse.** Este tipo de central necesita de una mayor obra civil, ya que requiere la construcción de una presa que sea capaz de retener el agua para formar lo que se conoce como embalse, en la misma presa, se dejan rejillas de control que permiten el paso o no del agua almacenada en el embalse hacia las turbinas, estas rejillas hacen las veces de toma en este tipo de centrales, al dejar pasar el agua almacenada en el embalse, el agua se dirige hacia la turbina, la cual acciona al generador eléctrico y produce electricidad, la cual, puede adaptarse a la demanda por medio de la regulación del caudal por medio de las rejillas de control. Luego de haber realizado la función de

proporcionar el movimiento mecánico necesario en la turbina, el agua se incorpora al cauce del río por medio de desagües.



Figura 2.10. Ejemplo de Tubería forzada dirigida hacia la casa de máquinas<sup>10</sup>.

Para el caso particular de la central que se pretende instalar en el Río Copinula, el tipo de instalación sería de agua fluyente, en la cual se haría una infraestructura civil que básicamente permita almacenar volumen de agua por medio de un dique, aguas arriba de la caída, dejando pasar el caudal ecológico en el cauce original y derivando el caudal destinado para turbinar, además con las dimensiones del dique también se puede aumentar la altura aprovechando aún más el potencial. Ver figura 2.11.

La obra civil que se propone instalar en la mini central del Río Copinula, consta principalmente, de un pequeño dique en la parte superior del salto lo que permitirá principalmente almacenar volumen de agua para garantizar el caudal a turbinar ( $1.5327 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y a la vez permitirá el paso del caudal ecológico calculado en el apartado 2.5. El lugar en donde se colocará la casa de

<sup>10</sup> Fotografía de Central Río Sucio, gracias a Compañía Eléctrica Cucumacayán S.A (CECSA).

máquinas es un lugar semiplano, en el cual no se requiere trabajos de terracería, la tubería forzada se coloca en dirección contraria a la dirección natural del río, en aras de que una vez utilizado el caudal por las turbinas, se proceda a su reincorporación en la dirección natural del río. Es importante mencionar que en el caso de la toma de agua, esta debe tener mecanismos de protección de tal manera que no pasen cuerpos extraños como arboles o piedras que puedan dañar los álabes de las turbinas.

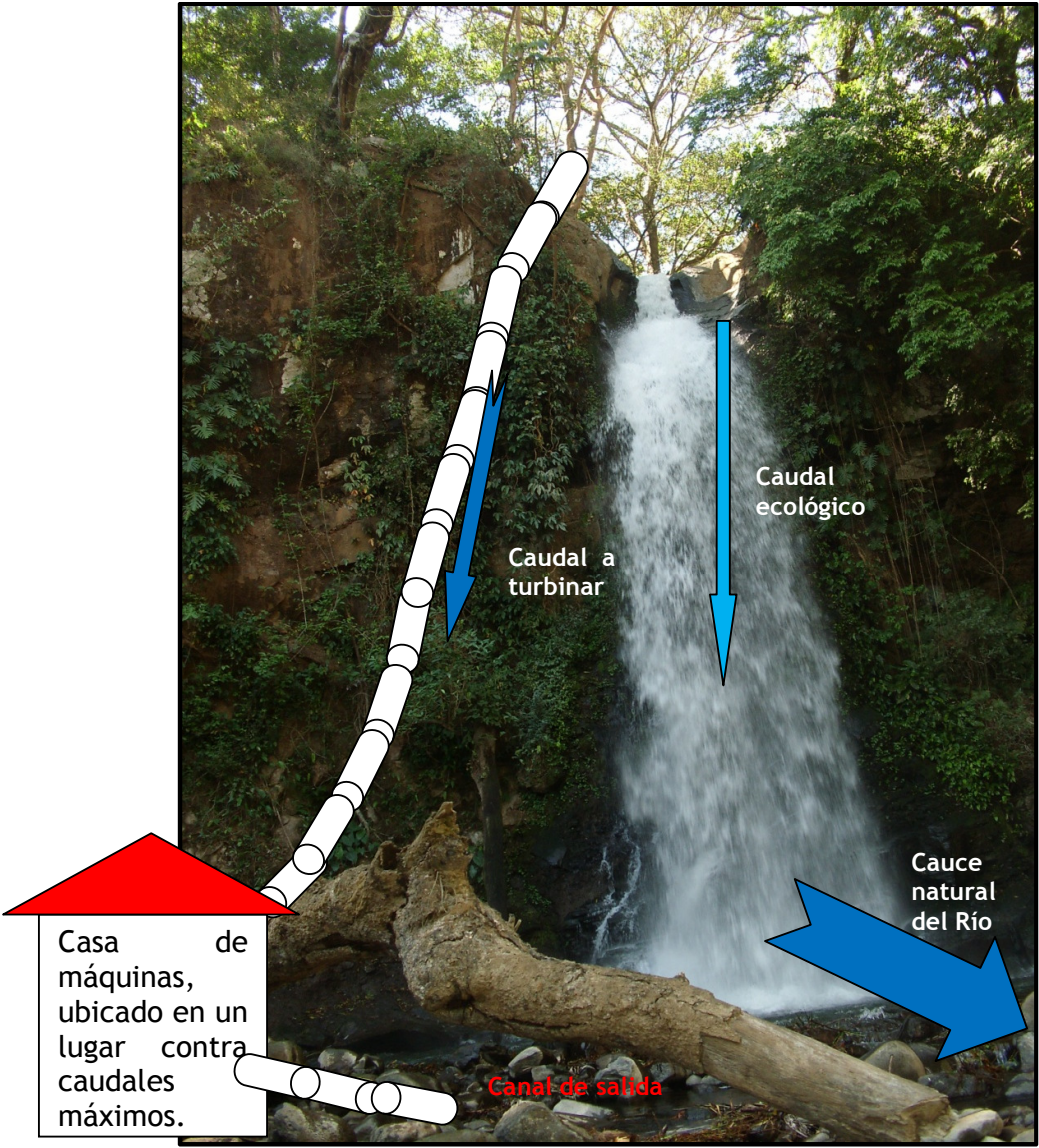


Figura 2.11. Esquema de distribución de principales componentes de obra civil.

Independientemente del tipo de central hidráulica para generación de electricidad que se trate, y de las condiciones propias del lugar donde se quiera construir, indudablemente tendrá como mínimo los siguientes componentes.

- a) **Obra civil.** Principalmente en la obra civil se considera todo lo relacionado con el acondicionamiento del lugar para aprovechar al máximo el recurso disponible, por ejemplo, la parte de las presas y circuitos hidráulicos, etc. En términos generales, los circuitos hidráulicos, están formados por la toma de agua, la cual principalmente cuenta con rejillas de control para abrir y cerrar el paso de agua y para utilizarla como filtro de tal forma que no pasen elementos sólidos que puedan dañar los álabes de las turbinas, la tubería forzada que constituye la forma en la cual, se conduce el agua por el circuito hidráulico, los materiales que se emplean en este tipo de tubería son muy diversos, dependiendo de la presión que manejará, sin embargo los materiales más utilizados son el acero, el hormigón y el polietileno. Independiente el material que se utilice, se deben soportar fenómenos como el denominado golpe de ariete, el cual se origina en la tubería por fluctuaciones del caudal que circula por la misma, lo que conduce a variaciones en la presión interna de la tubería, por encima y por debajo de la presión de trabajo, este fenómeno se puede minimizar colocando medidas que amortigüen las variaciones de presión, una de las medidas es colocar lo que se le conoce como chimeneas de equilibrio.

Otro componente importante de la obra civil es la denominada casa de máquinas, que es el recinto en el cual se instalan la turbina y el generador eléctrico así como dispositivos de control y protección de tal manera que la instalación funcione con los parámetros de diseño establecidos, además, la casa de máquinas sirve como puente entre las tuberías que traen el agua sin turbinar y el desagüe de esta última luego de haber pasado por la turbina.

b) **Turbinas hidráulicas.** Este elemento es primordial en una instalación hidroeléctrica ya que es el que tiene el contacto directo con el agua del río dirigiéndola para producir el movimiento rotacional mecánico necesario, convirtiendo la energía cinética y potencial del agua en energía mecánica en el eje de la turbina. Sin embargo, este movimiento mecánico en el eje no es suficiente para hacer girar con la velocidad necesaria al generador eléctrico para producir electricidad, por lo que, es necesario utilizar engranajes mecánicos que multipliquen la velocidad baja y la aumenten de tal forma de lograr obtener las revoluciones esperadas para que el generador eléctrico funcione correctamente. El principio de funcionamiento de una central hidroeléctrica se muestra en la figura 2.12. En este estudio preliminar, se plantea la solución con las turbinas más utilizadas en proyectos hidráulicos, sin embargo, debe considerarse también la alternativa de otros tipos de turbinas no convencionales siempre y cuando se adecuen a las condiciones de operación esperadas y a las características del lugar en donde se pretende instalar la turbina.

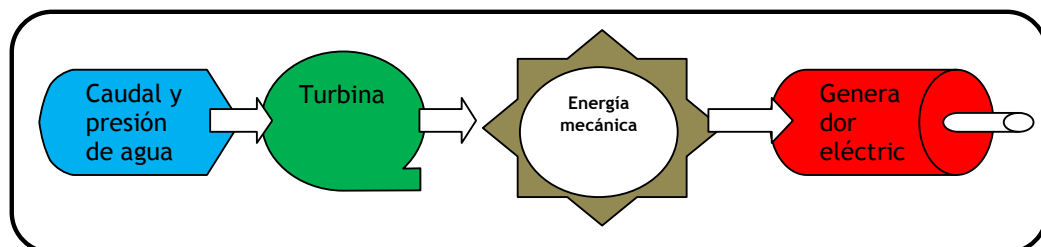


Figura 2.12 Principio de funcionamiento de una central hidroeléctrica.

En la figura 2.13 se muestra una casa de máquinas típica, en la cual se encuentran alojados las turbinas y los generadores.



Figura 2.13. Conjunto Turbina-Generador en central hidroeléctrica Río Sucio<sup>11</sup>.

Existen diferentes tipos de turbinas, las cuales se clasifican en términos generales como turbinas de acción y turbinas de reacción, las primeras aprovechan la presión dinámica debida a la velocidad del agua en el instante en que interactúan con la turbina y el agua hace contacto de manera tangencial a los álabes, mientras que las de reacción, aprovechan además la presión estática por el hecho de trabajar en el interior de compartimentos cerrados a presión superior a la atmosférica.

Clasificación compuesta, Salto-Forma de trabajo			
	Gran salto	Salto medio	Salto bajo
<b>Acción (Impulso)</b>	Pelton	Ossberger	Ossberger
	Turgo	Turgo Pelton multichorro	
<b>Reacción</b>		Francis Deriaz	Hélice Semi-Kaplan Kaplan

Figura 2.14. Clasificación de las turbinas hidráulicas por el salto y forma.

<sup>11</sup> Fotografía gracias a CECSA.

Las turbinas que más se utilizan en centrales hidroeléctricas son la turbina Pelton, que trabaja bajo el principio de acción y las turbinas de reacción Francis y Kaplan, en estas últimas, el rodete opera completamente sumergido para funcionar de manera eficiente, es por ello que a este tipo de turbinas se les conoce como turbinas de admisión total.

La turbina Pelton, es la que más se utiliza en proyectos hidráulicos de acuerdo al caudal y altura de un lugar en particular. Su construcción se caracteriza porque el rodete consta de una especie de cucharones que son los que permiten la interacción entre el agua y la turbina. El chorro de agua guiado por tubería forzada, choca contra los cucharones lo que produce el movimiento rotacional en el eje de la turbina.

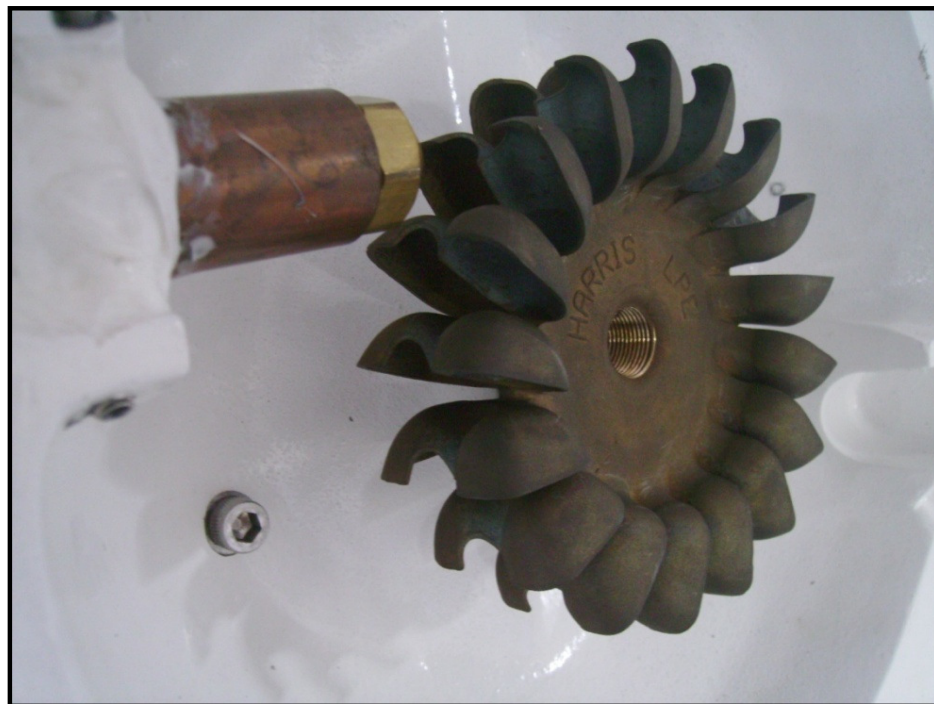


Figura 2.15. Rodete y álabes de una Turbina Pelton Típica<sup>12</sup>.

Este tipo de turbina se utiliza principalmente en aquellos lugares en los que se cuenta con un gran salto, tomando precisamente este parámetro como el más importante, sin importar mucho, la variación del caudal.

---

<sup>12</sup> Fotografía gracias a Sala Científica Estadounidense para la Investigación en Energía. Universidad Don Bosco.

El rendimiento de este tipo de turbinas Pelton es aproximadamente del 80% de la energía del agua que se transforma en energía mecánica en el eje.

Por otro lado, la turbina Francis perteneciente al grupo de turbinas de reacción, se caracteriza porque el rodete se debe colocar sumergido completamente, al hacer esto, se logra que la turbina trabaje eficientemente.

Esta turbina, de diferente tecnología que la Pelton, también es de las más utilizadas en la mayoría de centrales hidroeléctricas.



Figura 2.16. Rodete de una Turbina Francis<sup>13</sup>.

La Turbina Francis, está compuesta principalmente por los siguientes componentes:

- Cámara de alimentación
- Distribuidor
- Rodete
- Tubo de aspiración.

Estas partes son las que le proporcionan a la turbina la característica de cambiar la dirección del agua dentro de la misma, ya que el flujo entra en la

---

<sup>13</sup> Fotografía gracias a CECSA.

turbina en dirección radial fluyendo hacia su eje, pero sale en dirección axial.

Por su parte, el rodete es el encargado de transmitir la energía cinética de rotación necesaria para hacer funcionar el generador. La turbina posee un parámetro denominado velocidad específica ( $n_s$ ), la cual expresa las revoluciones por minuto (rpm) a la que la debe girar la turbina para generar un *kilowatt* si se tuviera un salto “H” de un metro. Esta velocidad específica es la misma para aquellas turbinas que poseen proporciones geométricas iguales independientemente el tamaño, la velocidad específica se calcula de la siguiente manera.

$$n_s = n \frac{\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad \text{Ecuación 2.5.}$$

Donde “n” es la velocidad de sincronismo, “P” la potencia de la turbina y “H” la altura del salto.

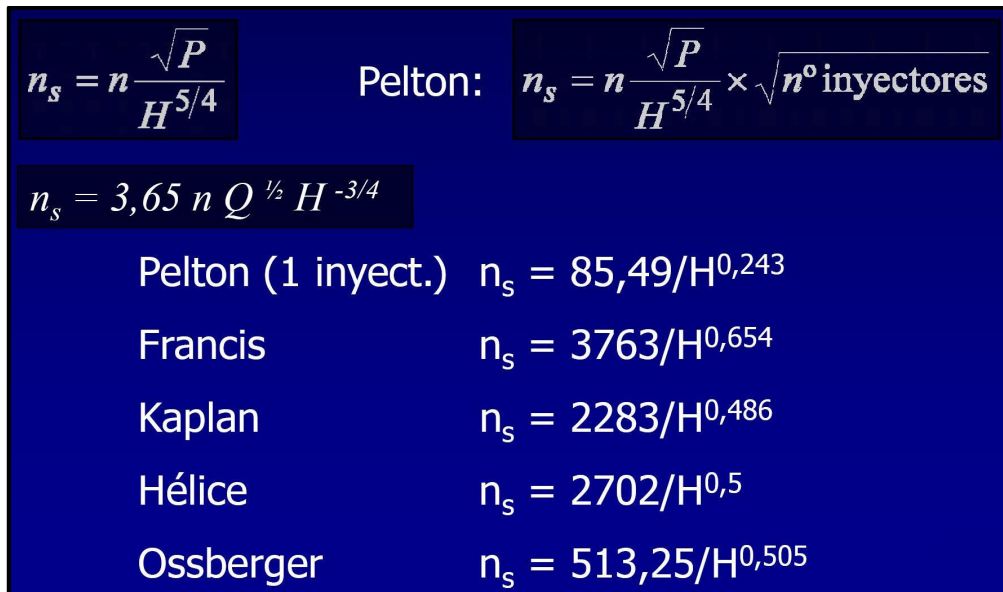


Figura 2.17. Velocidades específicas para varias tecnologías.

Otras opciones de tecnologías adecuadas a las condiciones en los saltos en río copinula son utilizar son las turbinas Turgo y las Banki – Mitchell (Ossberger), que se adaptan desde caudales muy bajos y saltos variados (de 1 a 200 m), a continuación, se presentan las características de tal tecnología.

## Turbina Össberger

- También llamada de Banki-Michell
- Inyector rectangular que lanza el agua sobre un tambor provisto de álabes
- Doble impulsión, a la entrada y a la salida
- Rango de alturas 1-200m
- Rango de caudales grande
- Trabaja bien a carga parcial



Figura 2.18. Datos sobre las turbinas Banki - Mitchell.

Independientemente del tipo de turbina de reacción que se utilice siempre deben poseer tubo de aspiración o difusor, el cual tiene como funciones principales, guiar el agua que abandona el rodete al canal de descarga; recuperar la altura estática o de aspiración presente entre la salida del rodete y el nivel de agua del canal de descarga y recuperar la mayor cantidad de energía cinética a la salida del rodete.

Otra característica de suma importancia que debe considerarse al trabajar con las turbinas, son las curvas características de las mismas, ya que las turbinas no siempre funcionan en el punto de diseño, es decir, no siempre mantienen constantes el salto, el caudal o la velocidad, por lo que es necesario tener claridad que si una de estas variables se modifica, al menos modificará una de las otras variables, es por ello que al comprar una turbina, los fabricantes a partir de pruebas proporcionan las curvas que relacionan estas variables y estiman características de operación.

Entre las curvas que proporcionan los fabricantes se encuentran:

- ✓ La curva par-velocidad de giro, para diferentes grados de admisión
- ✓ La curva potencia-velocidad de giro, para diferentes grados de admisión
- ✓ La curva caudal-velocidad de giro, para una altura neta y un grado de admisión dados

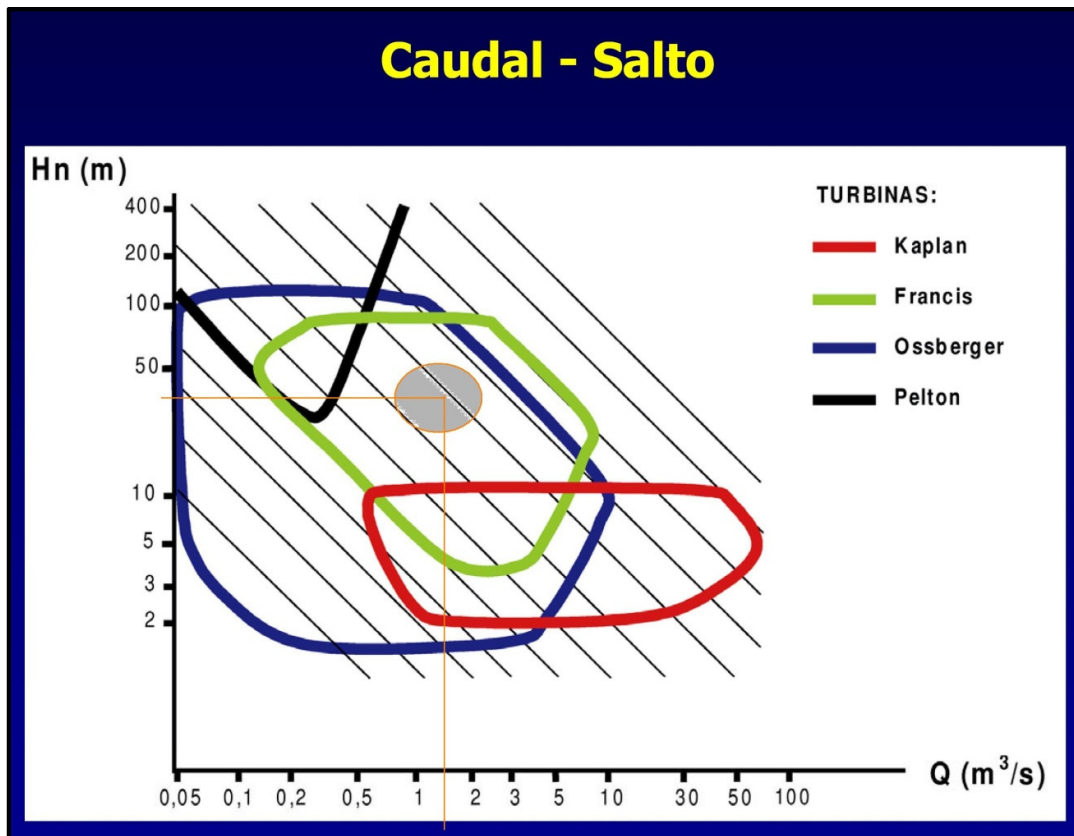


Figura 2.19. Curva Caudal – Salto para varias tecnologías de generación hidráulica. En la figura se indican las condiciones que se tienen en los saltos sobre el río copinula [21]

Sin importar el tipo de turbina que se tenga, ellas giran a una velocidad determinada, sin embargo es muy escasa la posibilidad de que la velocidad de giro de la turbina coincida con la velocidad de operación del generador eléctrico que se acoplará con la misma, por ejemplo, las turbinas de baja altura de carga suelen girar a velocidades que rondan las 400 rpm, velocidad que es inferior a la de operación de los generadores, los generadores requieren alrededor de 1600 rpm, por lo tanto, es necesario incorporar multiplicadores mecánicos para

acoplar la velocidad de giro de la turbina con la velocidad de operación del generador eléctrico, si bien es cierto este es un punto que se desea lograr, el hecho de incorporar un multiplicador de este tipo conlleva a una disminución del rendimiento global del sistema, esta disminución puede rondar el 5%, generalmente, el multiplicador de velocidad está constituido por una caja de engranajes.

**c) Generadores Eléctricos.** Un generador eléctrico es una máquina que requiere energía mecánica para producir electricidad, la energía mecánica rotacional necesaria para el generador la proporciona la turbina. Existen dos tipos de generadores, los de corriente directa denominados dínamos y los de corriente alterna conocidos como alternadores, éstos últimos son los que se utilizan en la actualidad.

El alternador está compuesto de dos partes fundamentales, una parte móvil denominada rotor, el cual se encarga de generar un campo magnético variable en el tiempo al girar debido al hecho de estar acoplado con el eje de la turbina; la otra parte es una estructura fija llamada estator, en el que se genera la electricidad. Los generadores pueden colocarse de tal forma que el eje de los mismos quede en posición vertical u horizontal.

En las aplicaciones actuales se utilizan generadores de corriente alterna que pueden ser de dos tipos.

**Generadores síncronos.** En este tipo de generadores se necesita alimentar el devanado del rotor con corriente directa, esta inyección de corriente da lugar a un campo magnético giratorio en el interior del generador que produce un sistema trifásico de tensiones en los bobinados del estator. Como el rotor gira, se necesitan mecanismos especiales para llevar a cabo el suministro de la corriente directa de excitación.

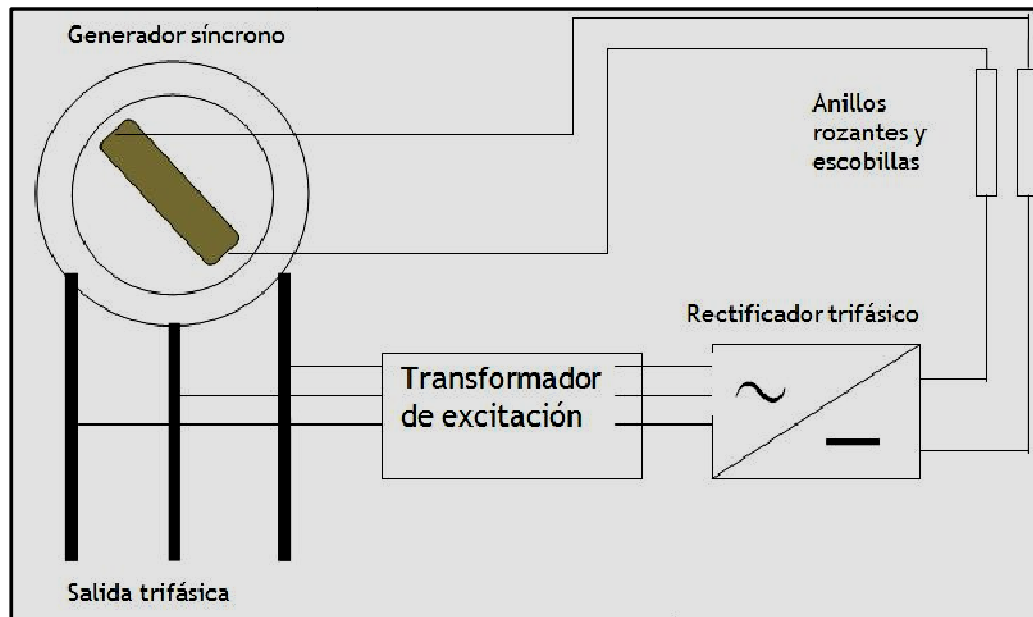


Figura 2.20. Generador síncrono auto excitado.

Esta corriente directa se puede suministrar básicamente de tres formas, por medio de autoexcitación, excitación sin escobillas y excitación auxiliar; ésta última se basa en alimentar el rotor mediante la corriente directa generada por una dinamo auxiliar regulada por un reóstato y colocada sobre el eje del generador. Por otro lado, la autoexcitación consiste en tomar la corriente desde los terminales del mismo generador, modificarla mediante un transformador de excitación y luego rectificarla por medio de un sistema electrónico estático para alimentar el devanado inductor mediante un dispositivo de escobillas y anillos rozantes que rodean el eje del generador, pero aislados de dicho eje, en la figura 2.20, se presenta un esquema del generador síncrono auto excitado.

Este sistema de autoexcitación es el que más se emplea por ser más económico que las otras dos versiones necesarias para producir la corriente directa de campo que se le inyecta al rotor. Cuando se arranca un generador de este tipo, no existe tensión en los bornes trifásicos por lo que tampoco se dispone de corriente de excitación, lo que conlleva la inclusión de una fuente auxiliar de corriente directa, por ejemplo una batería para que se inicie el funcionamiento.

La tercera forma de proporcionar la corriente directa al rotor, es por medio de la excitación sin escobillas, en la cual, se emplea un pequeño generador síncrono (excitatriz principal) cuyo inducido se acopla en el rotor y los polos inductores en el estator. La tensión trifásica de la excitatriz se rectifica a tensión directa mediante un puente de diodos, ubicado también en el eje del generador, y suministrada directamente, sin escobillas, al devanado de excitación del alternador.

El ajuste de la corriente de excitación del generador síncrono se lleva a cabo mediante el control de la corriente de excitación de la excitatriz principal (desde el estator), la cual puede ser suministrada por un transformador de excitación. Para independizar la excitación de fuentes energéticas del exterior, se suele incluir una excitatriz piloto. Ésta dispone de un generador de corriente alterna cuyo devanado de excitación está compuesto por imanes permanentes y el devanado trifásico en el estator.

Es importante mencionar que algunos generadores síncronos disponen de excitatrices sin escobillas, con el fin de disponer de una fuente de corriente continua auxiliar para las situaciones de emergencia cuentan también con anillos rozantes y escobillas. Para arrancar un generador síncrono debe hacerse en vacío, por medio de la regulación del sistema de admisión de agua de la turbina poco a poco se aumenta la velocidad de ésta y en el instante en que el generador síncrono alcanza una velocidad próxima a la de sincronismo, se conecta la excitación.

**Generadores asíncronos o de inducción.** Este tipo de generadores se caracteriza por el hecho de que necesitan capacitores a la salida que compensen la energía reactiva generada. El campo magnético debe estar conectado a la red eléctrica y obtener de ella la corriente reactiva necesaria.

Cuando la turbina hidráulica incrementa la potencia se produce un

incremento en la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad a plena carga de un motor, este parámetro se le denomina deslizamiento (s) y se expresa matemáticamente como:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \quad \text{Ecuación 2.6.}$$

Donde:

S = Deslizamiento

$n_s$  = Velocidad síncrona [en revoluciones por minuto (rpm)]

n = Velocidad real del rotor [en revoluciones por minuto (rpm)]

Esta diferencia se origina porque la red eléctrica es la que fija la frecuencia. Para llevar a cabo el arranque del generador asíncrono se actúa sobre la admisión de agua en la turbina, de tal manera que ésta se vaya acelerando hasta que el generador se aproxime a su velocidad síncrona, instante en el cual, se cierra el interruptor automático de línea.

Existen muchas variables involucradas en la generación de electricidad por medio de centrales hidroeléctricas por lo que se hace necesario la incorporación de sistemas que permitan el control y protección de dichas variables en aras de lograr no sólo un funcionamiento correcto sino más bien, un funcionamiento eficiente de todos los dispositivos y maquinaria involucrada en la generación de electricidad.

En cuanto a las turbinas, el control que se requiere es el relacionado con la regulación del caudal, controlando a su vez la velocidad de la turbina para hacer funcionar al generador de manera eficiente, este control de la velocidad, se lleva a cabo principalmente, regulando el caudal de entrada a la turbina y regulando además la tensión del alternador, los sistemas de control permiten que, por ejemplo, si se disminuye la demanda de energía eléctrica, la turbina tiende a acelerarse por lo que es necesario que un sensor de velocidad detecte

dicho incremento en la turbina y debe enviar una señal a un actuador (servomotor) para que regule el grado de apertura de los álabes de tal manera de controlar el caudal de agua que pasa por la turbina y por ende, velocidad de la misma.

En lo referente a las protecciones, éstas pueden ser de tipo mecánico, eléctrico o electrónico, dichas protecciones tienen como función principal asegurar la integridad de los diferentes dispositivos que forman parte de la central hidroeléctrica.

En el caso de centrales hidroeléctricas que suministran energía mediante generadores asíncronos, no se precisa actuar sobre los reguladores de caudal de las turbinas para controlar la velocidad de rotación de éstas, ya que la velocidad de giro la impone la frecuencia de la red eléctrica del país, 60 Hz para el caso de El Salvador. En este caso, el control del generador se logra mediante tiristores, sin embargo, la regulación de caudal se requiere siempre y cuando se presenten situaciones denominadas de embalamiento como lo es la caída de carga por ejemplo, en estos casos es que la regulación sirve para cerrar el suministro de agua a la turbina a una velocidad tal que no se genere el problema relacionado con el golpe de ariete y no se embale la turbina. En el caso de la propuesta para el Río Copinula se plantea una central no conectada a la red eléctrica.

En el caso de las turbinas lo que determina el tiempo de arranque es la inercia de los mecanismos como multiplicadores y generadores; así como también de la velocidad nominal de la turbina y de la potencia nominal de la misma. Por su parte, el tiempo de arranque de la columna de agua depende del salto y de la longitud y velocidad de dicha columna.

En la actualidad además de los controles automáticos o automatización de los componentes en el lugar de la instalación es necesario realizar el

monitoreo del comportamiento de la central de manera remota, desde cualquier lugar lejano, este monitoreo comprende principalmente, la medición y control por medio de circuitos electrónicos inteligentes que envíen señales de advertencias en el caso de que algún componente no esté funcionando de manera adecuada, estos sistemas de telemetría, toman información de varios parámetros de operación, los cuales pueden ser visualizados en una pantalla digital, compararse con operaciones anteriores y almacenar dichos comportamientos en bases de datos. Además, la mayoría de las centrales modernas deben incluso poseer sistemas de telemando de tal forma de permitir que la central pueda ser controlada a distancia por un operador. Para el caso de la central del Río Copinula no se considera la utilización de este tipo de sistemas conocidos como SCADA<sup>14</sup>.

En el caso de que la central se quiera conectar a la red eléctrica, se debe considerar máquinas eléctricas adicionales, como el transformador, el cual, como su nombre lo indica, es una máquina estática que se encarga de modificar o transformar los niveles de tensión generados en la central para adaptarlos a los niveles requeridos por la red eléctrica, estos transformadores, elevan la tensión para reducir las pérdidas durante el transporte de la energía, por medio de las líneas de transmisión.

En la mayoría de las centrales pequeñas, el transformador de baja-media o media-alta se instala en el interior de la casa de máquinas, sin embargo, a veces estos dispositivos se colocan afuera de ella.

Considerando lo descrito anteriormente, la estimación de la energía que puede proporcionar una pequeña central debe incluir el efecto que tendrían los diferentes componentes que se encuentran en la central, además de conocer el caudal de agua disponible a lo largo de un año, por lo cual es necesario tener datos que proporcionen información relacionada con la variación del caudal

---

<sup>14</sup> Supervisory Control And Data Acquisition

durante un cierto número de años, o mejor aún, se puede realizar un estudio hidrológico que contemple las variaciones.

En tal estudio es necesario tener en cuenta una serie de caudales:

- El caudal de servidumbre, el cual se compone del caudal ecológico o caudal mínimo necesario para mantener las condiciones y estructura del ecosistema al cual pertenece el río en el cual se está evaluando el potencial, y del caudal que destinado para otros usos entre el 2.5% y el 10% según el método de CEMAGREF.
- El caudal de equipamiento  $Q_e$ , el cual se selecciona para lograr el volumen turbinado máximo.
- El caudal mínimo técnico, depende del tipo de turbina seleccionada y es proporcional al caudal de equipamiento (aproximadamente,  $0.1 \cdot Q_e$  para Pelton,  $0.25 \cdot Q_e$  para Kaplan y  $0.4 \cdot Q_e$  para Francis).

Si bien el caudal de servidumbre, de equipamiento y mínimo técnico son de suma importancia desde el punto de vista técnico, a la hora de implementar este tipo de proyectos se debe considerar también el aspecto económico, estableciendo alternativas de equipo que sean más económicos sin sacrificar eficiencia, o considerar, por ejemplo, la instalación de varios equipos de menor potencia en lugar de uno solo, pero en este documento nos enfocamos únicamente a los aspectos técnicos.

Retomando los caudales mencionados en el párrafo anterior, se modifica la ecuación 2.1, y la nueva ecuación que permite estimar la energía que una central depende del caudal, del salto neto  $H_n$ , y de las eficiencias de los dispositivos utilizados en el sistema.

$$P = 9.8 \left[ \frac{m}{s^2} \right] * \rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * Q \left[ \frac{m^3}{s} \right] * H_n [m] * \eta_t * \eta_m * \eta_g * \eta_{tr}$$

Ecuación 2.7.

Donde:

$H_n$  = salto neto = Salto útil ( $H_u$ ) – Pérdidas de carga ( $H_p$ )<sup>15</sup>

$\eta_t$  = Rendimiento de la turbina

$\eta_m$  = Rendimiento del multiplicador

$\eta_g$  = Rendimiento del generador

$\eta_{tr}$  = Rendimiento del transformador de salida

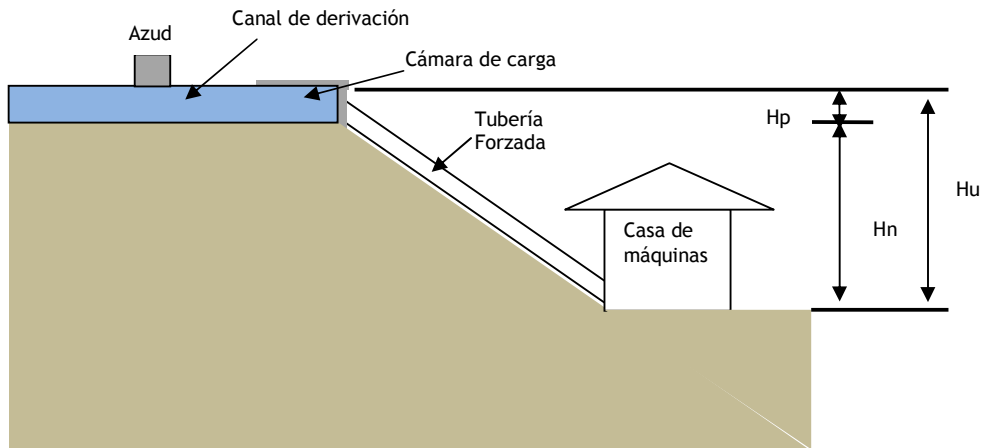


Figura 2.21. Saltos a considerar para la estimación de energía eléctrica.

Teniendo en consideración las consideraciones presentadas en las últimas páginas, la estimación inicial de la potencia eléctrica de 600818.4 We se debería ver afectada por las eficiencias de los equipos y máquinas utilizadas como parte de la instalación eléctrica, es así como si asumimos los siguientes rendimientos:

$H_n$  = salto neto = Salto útil ( $H_u$ ) – Pérdidas de carga ( $H_p$ ) = 40 m – 1.5 m = 38.5 m

$\eta_t$  = Rendimiento de la turbina = 0.834

$\eta_m$  = Rendimiento del multiplicador = 0.9

$\eta_g$  = Rendimiento del generador = 0.95

$\eta_{tr}$  = Rendimiento del transformador de salida = 0.98

<sup>15</sup> 1.5 metros de acuerdo a las condiciones del lugar

La potencia estimada considerando estos factores sería:

$$P = 9.8 \frac{m}{s^2} * 1000 \frac{kg}{m^3} * 1.5327 \frac{m^3}{s} * 38.5m * 0.834 * 0.9 * 0.95 * 0.98$$
$$= 404,112.425 W = 400 kWe$$

Si se desea un cálculo más preciso, se pueden estimar las pérdidas en los conductos utilizando la ecuación de Darcy y Weisbach, la cual es aplicable a flujos laminares y turbulentos, que fluyen en conductos de sección transversal arbitraria.

$$h_f = f \left( \frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación 2.7.

Donde:

$f$  = factor de fricción adimensional

$L$  = longitud del tubo [m]

$D$  = el diámetro de la tubería [m]

$V$  = la velocidad media en [m/s]

$g$  = 9,81 m/s<sup>2</sup> la aceleración de la gravedad.

A estas pérdidas hay que añadir las originadas por codos, válvulas y otros accesorios, una vez estimada la potencia instantánea se puede determinar la energía multiplicando la potencia en cada instante por el tiempo de funcionamiento.

Para este tipo de centrales también es necesario definir el denominado tiempo característico como el cociente entre la energía anual producida y la potencia instalada, el cual es una medida del grado de aprovechamiento de la central, este tiempo depende del tipo de central.

Sin embargo, con los datos obtenidos, se puede establecer el tipo de turbina que se utilizaría en el caso de la central en el Río Copinula.

En la figura 2.22 se presentan las principales opciones de las turbinas más reconocidas en el mercado, mostrando además los valores más importantes para escoger determinado tipo de turbina, como se puede observar

en dicha figura, la turbina Francis es la que cumple con las condiciones de un salto de 38.5 metros y un caudal de 1.5327 m<sup>3</sup>/s y la potencia de 400 kW está en el rango de los 250 kW a los 500 kW que maneja en estas condiciones dicha turbina.

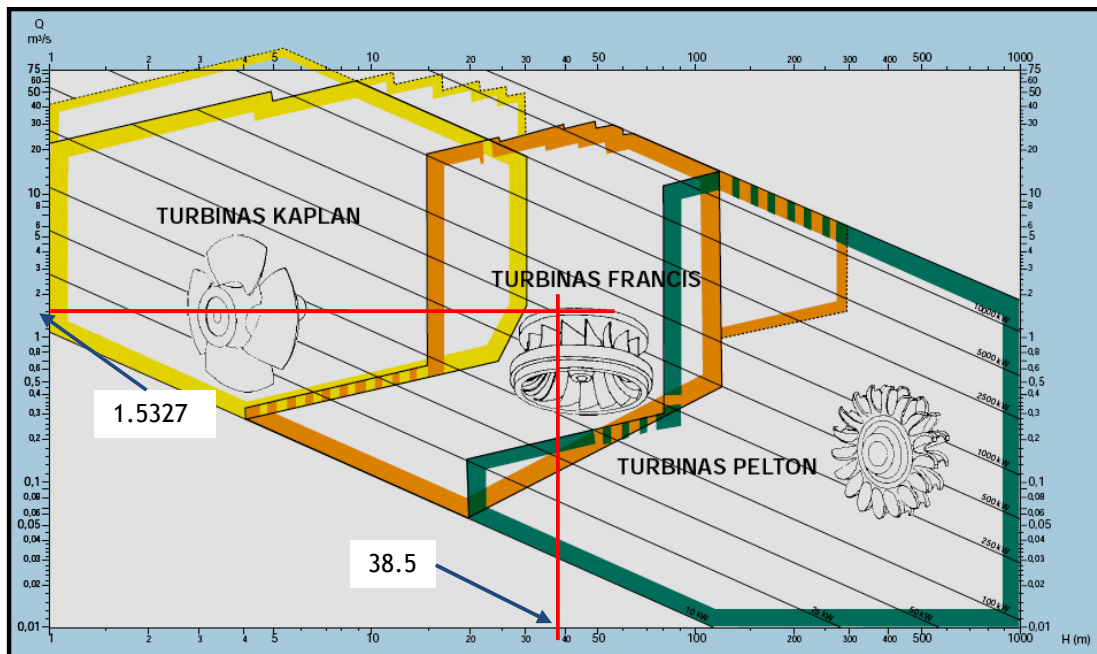


Figura 2.22. Principales tipos de turbinas utilizadas en centrales hidráulicas<sup>16</sup>.

Sin embargo, para la elección de la turbina definitiva para garantizar la máxima rentabilidad, se deben tener en cuenta las curvas de caudales clasificados, imprescindibles para determinar el caudal de equipamiento.

<sup>16</sup> Figura obtenida del libro Mini hidráulica en el País Vasco. Cortesía de VOEST-ALPINE.

## 2.8 Herramienta de software para estimar potencial hidráulico.

Existen diferentes herramientas de software para pequeñas centrales hidroeléctricas que permiten estimar la potencia eléctrica que se puede obtener de algún río, para el caso particular del Río Copinula, se utilizó el software denominado HIDRO 3® para comparar los resultados calculados a lo largo de este capítulo con los que brinda dicha herramienta de software. A continuación se muestra una imagen de la página introductoria de HIDRO 3®.

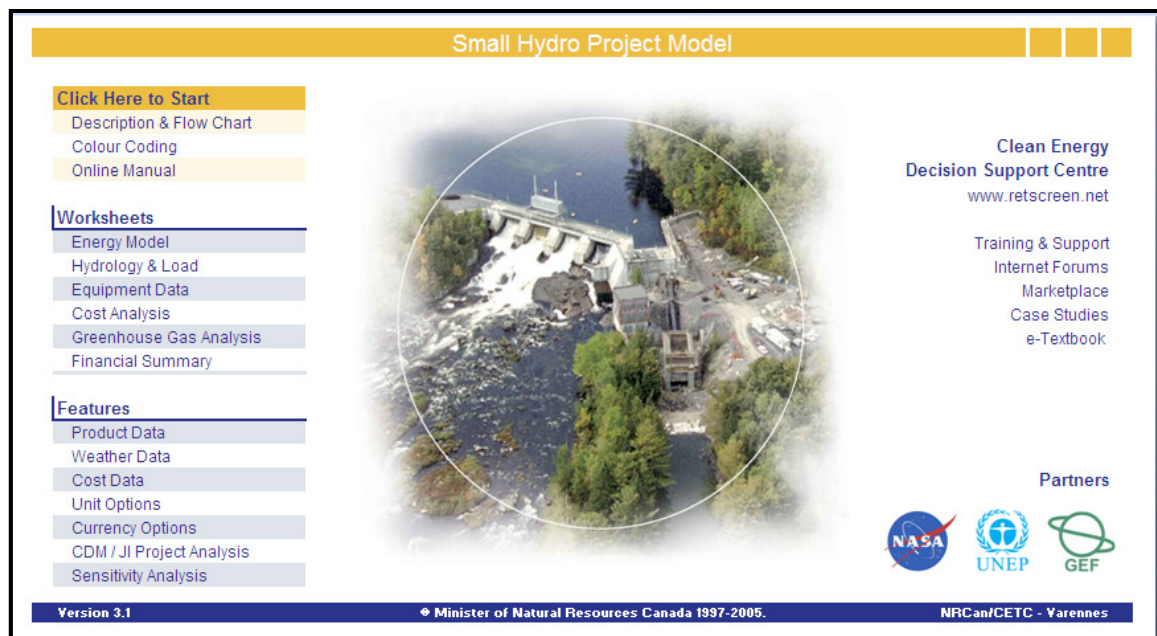


Figura 2.23. Pantalla introductoria del software utilizado para comprobar datos recabados en Río Copinula.

En la figura 2.24 se muestran las principales condiciones del sitio, estableciendo principalmente las coordenadas de latitud y longitud, así como el salto de 40 metros con los que se cuenta en el Río Copinula.

RETScreen® Energy Model - Small Hydro Project			<a href="#">Training &amp; Support</a>
Units: <input type="text" value="Metric"/>			
Site Conditions		Estimate	Notes/Range
Project name		Río Copinula	<a href="#">See Online Manual</a>
Project location		Ahuachapan, El Salvador	
Latitude of project location	°N	13.79	-90.00 to 90.00
Longitude of project location	°E	-89.86	-180.00 to 180.00
Gross head	m	40.00	
Maximum tailwater effect	m	1.50	
Residual flow	m³/s	0.05	→ <a href="#">Complete Hydrology &amp; Load sheet</a>
Firm flow	m³/s	1.43	
Peak load	kW	3,500	
Energy demand	MWh	18,286	

Figura 2.24. Condiciones del sitio utilizadas en el software.

Además de las condiciones del lugar, es necesario establecer las características del sistema, considerando como las principales, si se trata de un sistema aislado, el caudal de diseño, el tipo de turbina, las eficiencias y pérdidas involucrados en los sistemas electromecánicos. Las características del sistema simuladas en el software, se muestran en la figura 2.25.

System Characteristics		Estimate	Notes/Range
Grid type	-	Isolated-grid	
Design flow	m³/s	1.533	
Turbine type	-	Francis	→ <a href="#">Complete Equipment Data sheet</a>
Number of turbines	turbine	1	
Turbine peak efficiency	%	88.7%	
Turbine efficiency at design flow	%	84.6%	
Maximum hydraulic losses	%	5%	2% to 7%
Generator efficiency	%	95%	93% to 97%
Transformer losses	%	1%	1% to 2%
Parasitic electricity losses	%	1%	1% to 3%
Annual downtime losses	%	2%	2% to 7%

Figura 2.25. Características del sistema a utilizar en Río Copinula.

Con base a las condiciones del lugar y a las características del sistema, la producción de energía anual estimada en el Río Copinula se muestra en la figura 2.26. En la figura es de suma importancia observar que la capacidad estimada de la planta sería de 450 kW, muy similar a la capacidad determinada con cálculos desarrollados a lo largo de este capítulo.

Annual Energy Production		Estimate	Notes/Range
Small hydro plant capacity	kW	450	
	MW	0.450	
Small hydro plant firm capacity	kW	435	
Available flow adjustment factor	-	1.00	
Small hydro plant capacity factor	%	98%	40% to 95%
Renewable energy available	MWh	3,851	
Renewable energy delivered	MWh	3,851	
Excess RE available	GJ	13,862	
	MWh	0	

Figura 2.26. Pantalla en la que se estima la producción de energía anual.

En la figura 2.27 se establece una de las opciones de turbina Francis que podría utilizarse en este proyecto, con base a los resultados obtenidos en el lugar de interés ubicado en el Río Copinula.

Small Hydro Turbine Characteristics		Estimate	Notes/Range
Gross head	m	40.00	
Design flow	m³/s	1.533	
Turbine type	-	Francis	<a href="#">See Product Database</a>
Turbine efficiency curve data source	-	Standard	
Number of turbines	turbine	1	
Small hydro turbine manufacturer		ABC Ltd.	
Small hydro turbine model		model XYZ	
Turbine manufacture/design coefficient	-	4.5	2.8 to 6.1; Default = 4.5
Efficiency adjustment	%	0%	-5% to 5%
Turbine peak efficiency	%	88.7%	
Flow at peak efficiency	m³/s	1.3	
Turbine efficiency at design flow	%	84.6%	

Figura 2.27. Características de la turbina Francis que se puede utilizar en la central del Río Copinula

Es importante además, considerar las características de la turbina Francis a utilizar, principalmente la curva de eficiencia con la cual trabaja la misma, en la 2.28, se muestra esta importante característica de la Turbina Francis Seleccionada.

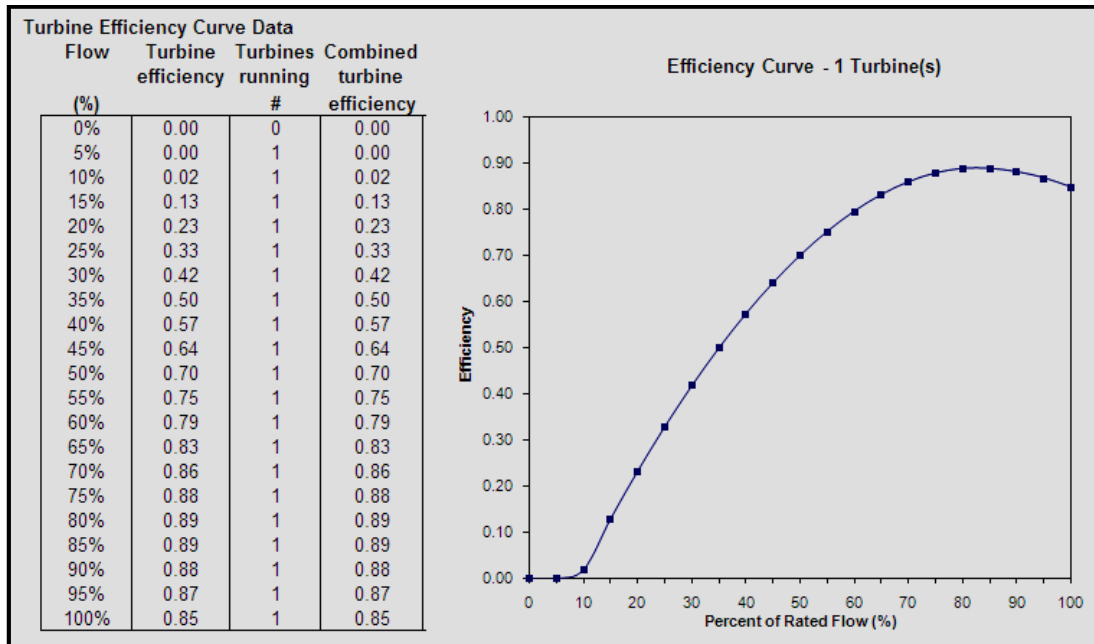


Figura 2.28 Curva de eficiencia de la Turbina Francis seleccionada para Río Copinula.

Finalmente, teniendo las características del lugar y las del equipo a utilizar, se procede a establecer cómo sería el comportamiento de la turbina en el Río Copinula, con el caudal de 1.5327 m<sup>3</sup>/s.

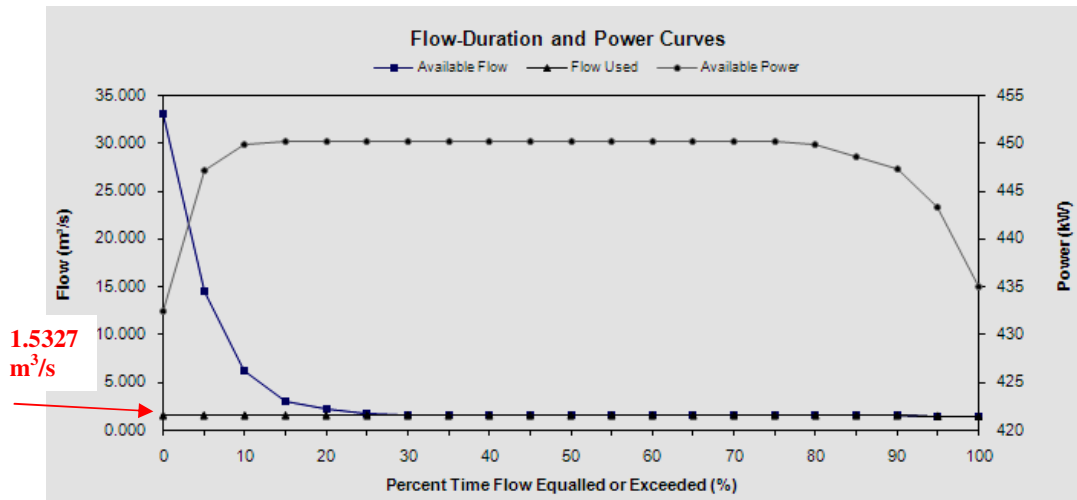


Figura 2.29 Curva de potencia y duración de flujo de la turbina Francis que se puede utilizar en la central del Río Copinula

Con el software, se puede realizar simulaciones para obtener los datos de comportamiento de varios tipos de turbinas, incluidas las más utilizadas.

## 2.9 Tecnología recomendada en los saltos ubicados en Rio Copinula

Debido a los datos obtenidos y las condiciones del lugar, se presentan dos posibles alternativas:

- a) Utilizar una turbina comercial, de las que más utilizan para generación aislada son: las micro turbinas Turgo y las de tipo Banky – Mitchell, las cuales deberán adaptarse a un generador síncrono, cuya potencia debe rondar los 400 kW.
- b) Desarrollar una tecnología específica acorde al contexto nacional: Utilizar un alternador de un Vehículo de transporte de carga (Tráiler) y modificarle el bobinado para adaptarlo a la velocidad y configuración de polos para acoplarlo a la turbina. En figura 2.26, se incluye otra idea que puede diseñarse para el contexto.

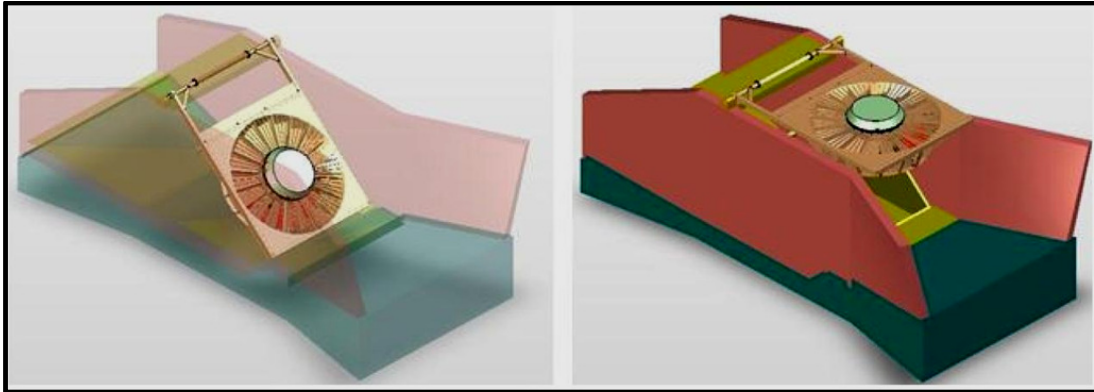


Figura 2.30 Otras alternativas de una turbina adaptable al cauce del río o a la tubería forzada de la propuesta. [25]

## 2.10 Valoración final del recurso hídrico de la micro cuenca Copinula.

Luego de analizar las diferentes variables climáticas y geográficas en la zona, se puede especificar lo siguiente:

- 1- Al revisar los históricos de precipitación, se recomienda considerar el almacenamiento de agua, aguas arriba de las caídas, principalmente en

el mes de octubre; con el fin de tener mayor capacidad de disponibilidad del recurso durante la época seca (noviembre a febrero), como lo muestra la figura 1.11 (precipitación en Jujutla).

- 2- Debido a que, se ha comprobado que aguas arriba de las caídas (ver figura 1.34), no hay extracciones exteriores desde el cauce del río, la reducción del caudal (tabla 1.18) en la época seca es aproximadamente hasta un valor mínimo de  $0.5532032 \text{ m}^3/\text{s}$  en el mes de marzo, además no se tienen datos que haya disminuido a niveles menores, indicando con ello, que siempre se tendrá disponibilidad de recurso (el cauce es perenne). La disponibilidad de caudal turbinable podría aumentarse en época seca, si se incluye la recomendación descrita en el numeral anterior, de incluir un dique cercano a las caídas, ubicado aguas arriba de los puntos de análisis.
- 3- Debido que, el cambio de almacenamiento hídrico es positivo, en la micro cuenca con un valor entre 300 a 500 mm, se puede asegurar que siempre se está acumulando agua en el nivel freático del río, con lo cual se asegura la disponibilidad del recurso.
- 4- Debido a las condiciones naturales (oroográficas) del cauce del río, unos metros antes de las caídas, ver figuras 2.3 (punto 1, los encuentros) y 2.4 (punto 2, el salto); donde el inicio del salto es formado por un vertedero natural de forma triangular, cuyos flancos son 2 piedras basálticas, lo cual contribuye a la construcción de un dique con tubería forzada, ganando a la vez con esto unos cuantos metros más de caída, pues el cuarto de máquinas puede ubicarse en una posición adecuada en la zona, aguas abajo del cauce en Copinula. En ambas caídas de agua, existe el potencial (espacio adecuado) para ubicar un pequeño dique.

## **CAPÍTULO III. CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL.**

### **3.1 Generalidades de un estudio de impacto ambiental.**

En este capítulo se proporciona una visión general sobre la importancia que tiene un estudio de impacto ambiental, con el cual se indaga en qué manera, un proyecto puede afectar el equilibrio ecológico de algún lugar en particular, estableciendo algunas consideraciones e indicadores que exigen los organismos internacionales y los gobiernos en donde se quiere implementar algún proyecto.

Un estudio de impacto ambiental considera un listado de acciones o actividades potencialmente impactantes, ordenadas en forma secuencial, de acuerdo a las etapas del proyecto y mientras dure la ejecución del mismo.

Para el caso del Río Copinula, se utiliza la "Metodología de los Criterios Relevantes Integrados" como es sugerido por Panameño y Yáñez, 1993, en dicha metodología, se hace un desglose de las actividades del proyecto, desglose de los factores ambientales con posibilidad de ser impactados, confrontación de actividades y factores ambientales y finalmente la Evaluación y priorización de impactos.

A lo largo de este capítulo, se presentan los principales aspectos que deben incluirse en un estudio de impacto ambiental, para lo cual, se considera un listado de actividades a las cuales debe prestárseles más atención, estas actividades se incluyen en tres fases del proyecto:

- a) **La preparación del sitio.** La preparación del sitio se refiere principalmente a los posibles daños al medioambiente que se pueden presentar a la hora de crear o rehabilitar caminos o la construcción de los mismos.

- b) **La construcción del proyecto.** Esta fase del proyecto es de las más críticas ya que es en esta fase en donde presentan los mayores impactos. Entre los aspectos más importantes que deben considerarse en esta fase se encuentran:
1. **Obra de toma.** En este sentido debe considerarse, el desvío del río y las excavaciones, las obras de mampostería, las compuertas y equipos, la tubería de conducción de obra de toma a túnel, es decir, lo relacionado a los trabajos realizados aguas arriba de la tubería forzada.
  2. **Tuberías.** El impacto ambiental que se debe considerar con respecto a las tuberías, se relaciona principalmente con la fabricación y suministro de las mismas, transporte y montaje de dicha tubería.
  3. **Casa de máquinas.** Es importante considerar en el estudio ambiental, la terracería y los taludes, fabricación de infraestructura, transporte y manejo y montaje de equipo electromecánico hacia la casa de máquinas.
- c) **El funcionamiento u operación del proyecto.** El estudio de impacto ambiental debe enfocarse principalmente en lo que se refiere al desvío del agua, la generación de energía y el mantenimiento de los caminos y calles de acceso a la central.
- d) **Cierre del proyecto.** Este aspecto debe considerarse, por ejemplo en determinar cómo se van a manejar los equipos y la infraestructura cuando ya no se utilice la central, es muy importante considerar este aspecto, ya que en la mayoría de situaciones se deben retirar dichos desechos del lugar en donde funcionó la central.

De acuerdo con las distintas fases del proyecto, la metodología seleccionada, requiere que se desarrolle un desglose de los factores o elementos ambientales susceptibles a ser afectados con la implementación del Proyecto, incorporando únicamente los relevantes para efectos de evaluación y toma de decisiones. Considerando la condición ambiental existente en Jujutla, en donde se considera establecer la mini central, se determinaron los componentes ambientales que podrían verse afectados en mayor medida si se implementa el proyecto; estos componentes se agrupan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Principales componentes a considerar en estudio de impacto ambiental.

COMPONENTE	EFECTOS	
<b>FÍSICOS</b>	Atmósfera	Calidad de aire Ruido
	Suelo	Relieve y topografía Suelo agrícola Estabilidad del suelo
	Agua	Caudal del Río Copinula Patrón de drenaje superficial Calidad del agua del río
<b>BIOLÓGICOS</b>	Flora	Flora Silvestre Flora Comercial
	Fauna	Fauna Terrestre Fauna Marina
<b>SOCIOECONÓMICOS Y CULTURALES</b>	Socioeconómicos	Desarrollo económico local Usos del agua de Río Infraestructura existente Producción de café
	Paisaje	Paisajes y vistas

Es importante mencionar que no se incluyen factores ambientales relacionados con el agua subterránea ya que, ninguna fuente de agua será dañada o alterada por la ubicación e instalación de los elementos del proyecto.

Las actividades a ejecutar en el proyecto y los factores ambientales

identificados a ser afectados, fueron confrontadas en un cruce matricial, utilizando para ello una matriz sencilla de doble entrada. En esa matriz, se señalan para las diferentes actividades del proyecto el impacto negativo, positivo o nulo que estas pudieran tener en cada uno de los componentes ambientales considerados. Los resultados que se obtuvieron del cruce matricial, se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados de interacciones entre actividades del proyecto y factores ambientales

FACTORES AMBIENTALES		POSITIVOS	NEGATIVOS
ATMOSFERA	Calidad del aire	1	10
	Ruido	0	6
SUELO	Relieve y Topografía	0	5
	Suelo Agrícola	0	5
	Estabilidad del Suelo	0	7
AGUA	Caudal del río copinula	0	4
	Patrón de drenaje superficial	0	6
	Calidad del agua del río	0	5
BIOLOGICOS	Flora Silvestre	0	6
	Flora Comercial	0	6
	Fauna terrestre	0	16
	Fauna acuática en río	0	4
SOCIO-ECONOMICO	Desarrollo económico local y regional	5	0
	Usos del río (pesca y agua)	0	2
	Infraestructura existente	0	3
	Producción de café	0	0
PAISAJE	Paisajes y vistas	0	3

En cuanto a la repetitividad, los componentes mayormente impactados negativamente con una repetitividad mayor de 5 son: calidad del aire, ruido, estabilidad del suelo, patrón de drenaje superficial, flora silvestre, flora comercial y fauna terrestre.

### **3.2. Evaluación y priorización de impactos**

Una vez se han identificado los posibles efectos debidos a la implementación del proyecto mini hidráulico en Jujutla es necesario, calcular el denominado Valor de Impacto Ambiental (VIA), el cual se basa en asignar una ponderación fundamentada en los siguientes criterios integradores:

- a) Probabilidad de ocurrencia. Que tan factible es que suceda en efecto considerado.
- b) Intensidad esperada del impacto. Si el efecto sucede, con qué nivel se piensa que afectará a la zona.
- c) Extensión afectada por la acción. Se basa en tener una idea clara de cuál sería la extensión territorial que se vería afectada.
- d) Duración de efecto impactante. Cuánto tiempo se espera que se afecte a la zona.
- e) Reversibilidad del impacto afectado. Considerar posibles alternativas para revertir en alguna medida el daño ambiental.

La tasa aplicada de la proyección para cada uno de los efectos depende de las siguientes consideraciones:

- La probabilidad de ocurrencia del impacto durante el proyecto como: alta, media o baja.
- La intensidad a ejercer en el medio por ese impacto como: alta, media o leve.
- Considerando la extensión como: generalizada o regional si afecta un área mayor a la del terreno o su área de influencia inmediata, local cuando afecta el proyecto y / o puntual si solo afecta áreas puntuales del proyecto.
- La duración: larga (efecto mayor de 5 años de persistencia), media (efecto entre 2 y 5 años) o corta (efecto menor de 2 años).
- La reversibilidad cuando es irreversible, o reversible ya sea que se obtenga a lo largo plazo o a corto plazo.

En la Tabla 3.3, se presenta el cálculo del Valor de Impacto Ambiental (VIA)

Tabla 3.3. Cálculo del valor de impacto ambiental (VIA)

FACTOR AMBIENTAL	PROBABILIDAD			INTENSIDAD			EXTENSIÓN			REVERSIBILIDAD			DURACIÓN			PUNTAJE
	Alta	media	baja	alta	media	leve	regional	local	puntual	irreversible	largo	corto	largo	mediano	corto	
Calidad del aire	2	1	0.4	3	1.5	0.6	2	1	0.4	2	1	0.4	1	0.5	0.2	4.5
Ruido	2				1.5				0.4			0.4			0.2	4.5
Relieve y topografía	2				1.5				0.4	2			1			6.9
Suelo agrícola	2					0.6			0.4	2			1			6
Estabilidad del suelo	2				1.5				0.4			0.4			0.2	4.5
Caudal del río Sensunapin	2				1.5				0.4				1			5.9
Patrón de drenaje superficial	2					0.6		1		2			1			6.6
Calidad de agua del río			0.4			0.6		1			1		1			4
Flora silvestre	2					0.6			0.4		1		1			5
Flora comercial	2					0.6			0.4		1		1			5
Fauna terrestre	2					0.6			0.4		1		1			5
Fauna acuática en río	2				1.5			1			1		1			6.5
Usos del río (pesca y agua)	2				1.5			1			1		1			6.5
Infraestructura existente			0.4			0.6			0.4				0.4		0.2	2
Salud ocupacional	2				1.5				0.4			0.4			0.2	4.5
Salud pública		1				0.6			0.4			0.4			0.2	2.6
Tráfico vehicular	2				1.5			1				0.4			0.2	5.1
Producción de café	2					0.6			0.4		1		1			5
Paisajes y vistas	2				1.5				0.4		1		1			5.9
TOTAL															90.1	
VIA PROMEDIO															5	

Para continuar el proceso de evaluación, es necesario determinar la relevancia de los diferentes impactos, considerando para su efecto la calificación de:

Muy Alto cuando su puntaje fuese igual o mayor de 8.0 (MA)

Medio en el rango de 4.0 a 6.0 (Mo)

Este proceso de valoración fue aplicado, a los factores ambientales

considerados de mayor relevancia, siendo éstos, los que obtuvieron un valor de repetitividad negativa en la matriz de confrontación de actividades del proyecto y factores ambientales. En la Tabla 3.4, se muestran los resultados en cuanto a repetitividad, valoración y relevancia de los impactos ambientales negativos.

Tabla 3.4. Repetitividad, valoración y relevancia de los impactos ambientales negativos.

COMPONENTES	VALOR REPETITIVIDAD	VIA	RELEVANCIA
Calidad del aire	11	4.5	Medio (M)
Ruido	6	4.5	Medio (M)
Relieve y topografía	5	6.9	Alto (A)
Suelo agrícola	5	6.0	Medio (M)
Estabilidad del suelo	7	4.5	Medio (M)
Caudal del río Copinol	4	5.9	Medio (M)
Patrón de drenaje superficial	6	6.6	Alto (A)
Calidad de agua del río	5	4.0	Medio (M)
Flora silvestre	6	5.0	Medio (M)
Flora comercial	6	5.0	Medio (M)
Fauna terrestre	14	5.0	Medio (M)
Fauna acuática en río	4	6.5	Alto (A)
Usos del río (pesca y agua)	2	6.5	Alto (A)
Infraestructura existente	3	2.0	Bajo (B)
Producción de café	3	5.0	Medio (M)
Paisajes y vistas	3	5.9	Medio (M)

De los componentes ambientales evaluados, uno obtuvo relevancia calificada como Bajo (B), 11 fueron calificados como Medio (M) y 4 como Alto.

En general, el VIA promedio (5.2) y la Relevancia integrada de los impactos negativos que causará el proyecto se determinó como **Medio (5.0)**

Las principales afectaciones ambientales determinadas mediante la matriz de interacción que se han previsto ocurrirán al implementar el proyecto

se presentan en la siguiente Tabla 3.5. Es importante recalcar que solo describen los impactos considerados SIGNIFICATIVOS en la evaluación de impactos.

Tabla 3.5. Descripción de los potenciales impactos ambientales significativos que generara el proyecto.

IMPACTO AMBIENTAL	DESCRIPCION
Polvo por caminos y provisionales	Generación de polvo por trabajos de apertura de caminos, rehabilitación de caminos existentes e instalaciones provisionales. Principalmente al conformar el suelo e instalación de balastro. El impacto es de carácter temporal y reversible, afectara a nivel local, dentro de la propiedad a los empleados.
Ruido por transporte al sitio	Durante la construcción el constante paso de vehículos pesados hacia el proyecto, desde la ciudad de Jujutla incrementa los niveles de ruido.
Cambio de topografía por calles	Se modificara la topografía del lugar en unos puntos debido a la apertura de camino, aunque se ha buscado el trazo de la calle.
Salud ocupacional en preparación de sitio	Posibles riesgos ocupacionales a los empleados durante la construcción de caminos.
Tala de árboles y arbustos por caminos	Tala de ( ) árboles y arbustos de café debido a la apertura y rehabilitación de caminos
Tala de árboles y arbustos por obras	Tala de árboles y arbustos de café en los sitios de ubicación de estructuras y sitios temporales de construcción. Considerando que los sitios son lineales/o puntuales no es un área concentrada a talar, no genera fragmentación de hábitat.
Ruido por transporte al sitio	Durante la construcción el constante paso de vehículos pesados hacia el proyecto, dese la ciudad de Jujutla incrementa los niveles de ruido.
Afectación a fauna terrestre por obras	La presencia de vehículos pesados y personas durante la construcción de estructuras y sitios temporales accesos en el plazo de construcción de los mismos afecta la fauna silvestre en el sitio del proyecto.
Salud ocupacional en	Posibles riesgos ocupacionales a los empleados durante la

construcción	construcción.
Reincorporación del agua al río	Efecto en la dinámica del río debido a la reincorporación del agua en el punto de descarga, pudiendo erosionar las márgenes del río.
Reducción de fauna acuática	La fauna acuática consistente en peces, cangrejos, camarones y bentónica se verá drásticamente reducida en el tramo donde se desvía el agua del río, el efecto es permanente, ya que la hidroeléctrica opera al filo del agua. se tiene el efecto secundario en las personas que ocasionalmente pescan en el río.
Efectos en usos del río.	Al reducir el caudal se limitan otros usos que pudiesen tener del agua del río por los habitantes de la zona, tanto como fuente alternativa de abastecimiento de agua, pesca y posible riego. El efecto es permanente, aunque en poca magnitud considerando el difícil acceso al río y la distancia de los caseríos más inmediatos al tramo del río a afectar.

Para prevenir, atenuar, compensar o potenciar los efectos identificados en algunas de las acciones del proyecto, será necesaria la aplicación de medidas preventivas y mitigatorias sobre dichas actividades. Las medidas propuestas se exponen en lo que se le denomina Plan de Manejo Ambiental.

### **3.3 Programa de manejo ambiental.**

El propósito del Programa de Manejo Ambiental (PMA) es aportar las medidas ambientales tendientes a prevenir, atenuar y/o compensar los impactos ambientales negativos que pueda producir el proyecto, que generan efectos nocivos sobre la calidad de vida y/o el medio ambiente.

Conforme el Art. 24 del Reglamento General de la Ley de Medio Ambiente (LMA), el Programa de Manejo Ambiental –PMA- debe Comprender:

- a. La determinación, priorización y cuantificación de las medidas de prevención, atenuación y compensación de los impactos ambientales y delimitación de inversiones necesarias.

- b. Monitoreo.
- c. Cierre de operaciones y rehabilitación, cuando proceda; y,
- d. El estudio de riesgo y manejo ambiental de los casos que fuere necesario.

En este caso solamente se consideran los literales a, b, y d ya que c, no aplica por la duración del proyecto, planificado para 25 años o más.

El Art. 25 del Reglamento, menciona que el componente de determinación, priorización y cuantificación de las medidas de prevención, atenuación, y compensación de los impactos tenga como objetivo identificar y ejecutar las medidas ambientales que el titular del proyecto deberá realizar durante las diferentes etapas.

En la Tabla 3.6, se retoman los impactos ambientales negativos más significativos del proyecto para los cuales, se propone una o varias medidas ambientales, descritas en dicha tabla, en aras de minimizar los efectos nocivos que pueda producir el proyecto de la central hidroeléctrica.

En un estudio de impacto ambiental además de mencionar las medidas ambientales a implementar, es necesario establecer el costo en el que se incurriría la aplicación de las mismas, así como el tiempo estimado para su ejecución.

Tabla 3.6. Medidas ambientales propuestas para los impactos identificados con significancia negativa.

IMPACTO AMBIENTAL	DESCRIPCION	TIPO DE MEDIDA	DESCRIPCION DE LA MEDIDA AMBIENTAL PROPUESTA
Ruido por transporte al sitio	Durante la construcción el constante pasó de vehículos pesados hacia el proyecto. desde la ciudad de Jujutla incrementa los niveles de ruido	Prevención	Establecimientos de horarios para el transporte de los materiales y equipos para

			preparación
Cambio de topografía por calles	Se modificara la topografía del lugar en unos puntos debido a la apertura de camino,	Prevención	Remoción de bloques de gran tamaño, estabilización de talud, y manejo ambiental de cortes y rellenos
Afectación a fauna terrestre por caminos	La presencia de vehículos pesados y personas durante la construcción de caminos de accesos en el plazo de construcción de los mismos afecta la fauna silvestre en el sitio del proyecto.	Prevención	Capacitación en protección y cuidado de fauna
Salud ocupacional en preparación de sitio	Posibles riesgos ocupacionales a los empleados durante la construcción de caminos.	Prevención	Medidas de salud e higiene ocupacional
Tala de árboles y arbustos por caminos	Tala de árboles y arbustos de café debido a la apertura y rehabilitación de caminos	Compensación	Revegetación dentro de la propiedad en sitios de la propiedad con 260 arboles
Tala de árboles y arbustos por obras	Tala de árboles y arbustos de café en los sitios de ubicación de estructuras y sitios temporales de construcción. Considerando que los sitios son lineales y/o puntuales no es un área concentrada a talar, no genera fragmentación del hábitat.	Compensación	Revegetación dentro de la propiedad en alrededores de sitio de presa con árboles.
Ruido por transporte al sitio	Durante la construcción el constante paso de vehículos pesados hacia el proyecto, desde la ciudad de Jujutla incrementa los niveles de ruido.	Prevención	Establecer horarios para el transporte de los materiales y equipos para preparación del sitio.
Posible erosión	Debido a los trabajos de terracería y la construcción de rellenos, durante la construcción se produce arrastre de sedimentos al río.	Prevención	Drenajes en rellenos, bordas y zanjas para sedimentos, cobertura de protección
Afectación a fauna terrestre	La presencia de vehículos pesados y personas durante la construcción de	Prevención	Capacitación en protección y cuidado de la

por obras	estructuras y sitios temporales accesos en el plazo de construcción de los mismos afecta la fauna silvestre en el sitio del proyecto.		fauna.
Posible contaminación del suelo y agua por desechos y residuos	Contaminación del suelo si no se manejan apropiadamente los desechos y residuos, así como las aguas residuales de los trabajadores.	Prevención	Manejo de desechos residuos, separación de desechos y residuos, acopio, disposición final.
Efectos en usos del rio	Al reducir el caudal se limitan otros usos que pudiesen tener del agua del rio, y efectos en la fauna acuática.	Prevención	Aforo diario en el rio aguas abajo y mantenimiento en forma permanente del caudal ambiental del proyecto.
Reducción de fauna acuática	La fauna acuática consistente en peces, cangrejos, camarones, bentónica se verá drásticamente reducida en el tramo donde se desvía el agua del rio, el efecto es permanente, ya que la hidroeléctrica opera a filo de agua. Se tiene el efecto secundario en las personas que ocasionalmente pescan en el rio.	Atenuación	Construcción de estanques para repoblación de especies acuáticas, con drenajes, siembra de alevines y cuidado. Contratación de un biólogo especialista.
Efectos en usos del rio.	Al reducir el caudal se limitan otros usos que pudiesen tener del agua del rio por los habitantes de la zona, tanto como fuente alternativa de abastecimiento de agua, pesca, y posible riesgo. El efecto es permanente, aunque de poca magnitud considerando el difícil acceso al rio y la distancia de los caseríos más inmediatos al tramo del rio a afectar.	Compensación	Apoyo en equipamiento de escuelas y donación de árboles aguas arriba del proyecto, incluyendo capacitación.

## CONCLUSIONES.

- 1) Para garantizar la disponibilidad de agua es fundamental avanzar hacia esquemas de uso del suelo, que mejoren sustancialmente la regulación de las aguas superficiales y la recarga acuífera.
- 2) Según los datos hidrológicos de la zona cercana a las caídas de agua (El Salto y Los Encuentros), se puede asegurar continuidad anual del caudal útil a ser turbinado debido a que el cambio de almacenamiento regional se encuentra entre 300 a 500 mm al año
- 3) Para estimar el potencial hidráulico de un río en particular, es de suma importante tener datos hidrológicos que representen el comportamiento de la zona en los últimos años, además de realizar mediciones de caudal y de altura del salto, ya que estas dos variables son las que determinan el potencial.
- 4) Es necesario calcular el caudal ecológico, para alterar lo menos posible la zona en la cual se pretende realizar un proyecto mini hidráulico, dividiendo el caudal del Río, principalmente en dos caudales, uno para turbinar y el otro sería el ecológico.
- 5) Además del salto o altura propia de las cascadas, se puede ganar altura y por consiguiente aumentar la potencia eléctrica que se puede generar, ya que esta última depende además del caudal, de la altura aumentada del salto en este caso.
- 6) Existen diferentes tipos de turbinas que se pueden utilizar en proyectos mini hidráulicos, sin embargo la turbina a utilizar depende principalmente de tres factores, el caudal, el salto y la potencia que se puede generar, en el caso particular del Río Copinula, la turbina más adecuada es la tipo Francis.
- 7) Existen herramientas de software que permiten hacer estimaciones más precisas, sin embargo, para el caso de estudios preliminares como el nuestro, los valores calculados son muy cercanos a los obtenidos por simulación.

## RECOMENDACIONES

- 1) Algunos parámetros de escorrentía subterránea se desconocen por lo cual, se debe poner atención en lograr datos más precisos relacionados con este fenómeno.
- 2) Se recomienda continuar con los análisis en los dos saltos o caídas de agua, pues, ambos lugares tienen disponibilidad de generación durante todo el año.
- 3) En éste documento, se han considerado aspectos relacionados con la potencia de generación y la hidrología, sin embargo se debe profundizar más en la tecnología a utilizar, así como la realización de análisis económicos y de sensibilidad que contribuyan a tomar una decisión optima.
- 4) Es necesario valorar la oportunidad que tiene la empresa Borja Nathan de poder aprovechar el recurso hidráulico en una zona alejada de los asentamientos humanos, considerando si la generación no interferirá con el medio ambiente cercano a las caídas de agua.

## **Marco Conceptual.**

**Acuífero:** Cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas que puedan ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento.

**ANDA:** Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.

**Ahuachapán:** Departamento de El Salvador, en la zona occidental, con una población aproximada de 328, 340 y una Extensión de: 1, 239.6km<sup>2</sup>; uno de sus municipios es Jujutla.

**Alisios:** Son dos cinturones de viento que soplan desde los centros de alta presión subtropicales moviéndose hacia la zona de baja presión ecuatorial. Son vientos de poca altitud caracterizados por su consistencia en su dirección. En el hemisferio norte, los vientos alisios soplan desde el noreste y en el hemisferio sur los vientos alisios soplan desde el sureste.

**Alta presión o anticiclón:** Área de presión máxima relativa que tiene vientos divergentes. En el hemisferio norte, estos vientos adoptan una rotación en el sentido de los punteros del reloj. En el hemisferio sur la rotación ocurre en contra del sentido del avance de los punteros del reloj. Un anticiclón también es conocido como un área de alta presión.

**Aluviales:** Son suelos de materiales transportados o depositados en las planicies costeras y valles interiores. Son aluviones estratificados de textura variable. Son suelos recientes o de reciente deposición y carecen de modificaciones de los agentes externos (agua, clima, etc.). Se ubican en áreas ligeramente inclinadas o casi a nivel en las planicies costeras y valles interiores en donde el manto freático está cerca de la superficie y el drenaje por lo general es pobre. Son suelos de alta productividad permitiendo agricultura intensiva y mecanizada, aptos para toda clase de cultivos. Es factible el uso de riego.

**Andisoles:** Suelos originados de cenizas volcánicas, de distintas épocas y en distintas partes del país, tienen por lo general un horizonte superficial entre 20y 40 centímetros de espesor, de color oscuro, textura franca y estructura granular. Su capacidad de producción es de alta a muy alta productividad, según la topografía son aptos para una agricultura intensiva para toda clase de cultivos.

**Área Natural Protegida:** Son partes del territorio nacional legalmente establecida con el objeto de posibilitar la conservación, el manejo sostenible y restauración de la flora y la fauna silvestre, recursos y sus interacciones naturales y culturales que tenga alta significación por su función o sus valores genéticos, históricos, escénicos, recreativos, arqueológicos y protectores, de tal manera que preserven el estado natural.

**Azud o Bocatoma:** Es la estructura que se construye sobre el lecho del río con la finalidad de atajar cierto caudal de agua, para verter dicho caudal en el canal de derivación o tubería forzada.

**Baja presión o ciclón:** Área de presión de circulación cerrada con vientos rotativos y convergentes cuyo centro tiene presión mínima. La circulación gira en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte y viceversa en el hemisferio sur. Se le conoce también como sistema de baja presión.

**Cambio de almacenamiento:** Incremento o decremento del volumen de agua almacenada en la unidad hidrogeológica en un intervalo de tiempo cualquiera.

**Canícula:** Período de cinco ó más días secos, sin lluvia durante la estación lluviosa. Periodo entre julio o/y agosto en que la actividad lluviosa es frenada ó interrumpida por corrientes o masas de aire de alta presión subsidentes en la atmósfera superior.

**Caudal o Caudal efluente:** Flujo que abandona un curso de agua, lago, embalse, depósito, cuenca, formación acuífera, etc.

**Caudal de equipamiento.** Este caudal es el que se selecciona de tal manera para que el volumen turbinado sea máximo, se representa por  $Q_e$ .

**Caudal mínimo técnico.** Este caudal es proporcional al caudal de equipamiento y depende del tipo de turbina seleccionada (aproximadamente, 10%  $Q_e$  para turbina Pelton, 25%  $Q_e$  para turbina Kaplan y 40%  $Q_e$  para turbina Francis).

**Caudal ecológico o caudal ambiental.** Es el caudal mínimo necesario para mantener el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial que se encuentra en un determinado río en condiciones naturales.

**Caudal de servidumbre.** Este caudal lo componen el caudal ecológico y el caudal que se destina a otros usos.

**CEMAGREF:** Fórmula desarrollada para calcular el caudal mínimo para requerimientos ecológicos, desarrollado por el Instituto de Investigación de Agricultura y Medio Ambiente. Antony. Francia.

**Cuenca Hidrográfica:** Es un espacio geográfico cuyos aportes de agua son alimentados exclusivamente por precipitaciones que caen en el interior y el excedente de agua o en materia sólida transportadas por el agua forman, en un punto espacial único, una desembocadura, una estación de aforo, o un punto arbitrario.

**Cuencas homogéneas:** Son las cuencas hidrológicas en que, por tener características geomorfológicas, climatológicas, geológicas e hidrológicas similares, es válido transferir información hidrológica de una a otra.

**Desarrollo Sostenible:** Es el mejoramiento de la calidad de vida de las presentes generaciones, con desarrollo económico, democracia política, equidad y equilibrio ecológico, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

**Ecosistema:** Medio ambiente biológico que consiste en todos los organismos vivientes (biocenosis) de un lugar específico, incluyendo también todos los componentes no vivos (biotopo), los componentes físicos del medio ambiente con el cual los organismos interactúan, como el aire, el suelo, el agua y el sol.

**Energía hidráulica.** Este tipo de energía es la que se asocia a la energía contenida en una masa de agua que se encuentra a una altura específica (energía potencial), y la energía

asociada al movimiento de dicha masa de agua (energía cinética) la combinación de éstas últimas dos energías forman la denominada energía hidráulica.

**Escorrentía:** Hace referencia a la lámina de agua que circula sobre la superficie en una microcuenca de drenaje, es decir la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida. Normalmente se considera como la precipitación menos la evapotranspiración real y la infiltración del sistema suelo.

**Escurrimiento desde aguas arriba:** Es el volumen medio anual de agua que en forma natural proviene de una cuenca hidrológica ubicada aguas arriba de la cuenca o subcuenca en análisis.

**Evapotranspiración:** Es la cantidad total de agua que retorna a la atmósfera en una determinada zona por evaporación del agua superficial y del suelo, y por transpiración de la vegetación.

**Hidrógrama:** Representación gráfica de la variación del gasto o caudal con respecto al tiempo.

**Humedad Relativa:** Tipo de humedad que se basa en el cociente entre la presión actual del vapor del aire y la saturación de la presión del vapor. Usualmente se expresa en porcentajes.

**Impacto Ambiental:** Alteración de los efectos negativos para el ambiente natural, una comunidad, población o especie biológica en particular.

**Isolínea:** Línea trazada sobre un mapa para indicar el lugar geométrico de los puntos en los que determinada propiedad es constante (por ejemplo evapotranspiración, la salinidad, etc.)

**Jujutla:** Es un municipio del departamento de Ahuachapán en El Salvador, que limita con los municipios de Concepción de Ataco por el norte. San Francisco Menéndez y Tacuba la oeste, Acajutla y Guaymango por el sur y el este. Para su administración el municipio se divide en 13 cantones, los cuales son: Barra de Santiago, El Diamante, Faya, Guayapa Abajo, Guayapa Arriba, Las Mesas, Los Amates, Rosario Abajo, Rosario Arriba, San Antonio, San José El Naranjo, Tihuicha y Zapua.

**Latosoles Arcillo - Rojizos:** Suelos arcillosos de color rojizo en lomas y montañas. Son bien desarrollados con estructura en forma de bloques con un color generalmente rojo aunque algunas veces se encuentran amarillentos o cafésosos. Esta coloración se debe principalmente a la presencia de minerales de hierro de distintos tipos y grados de oxidación. La textura superficial es franco arcillosa y el subsuelo arcilloso. La profundidad promedio es de un metro aunque en algunos sitios se observa afloración de roca debido a los procesos de erosión.

**Litosoles:** Suelos de muy poca profundidad sobre roca pura, son suelos muy complejos. La mayoría son suelos cuyos horizontes superficiales han sido truncados a causa de una severa erosión laminar o sea que la erosión ocurre en laminas y no en forma de cárcavas, son suelos arcillosos como los latosoles pero muy superficiales. Las texturas varían de gruesa, arenas y gravas hasta muy pedregosos sobre la roca dura. El uso potencial es muy pobre de bajo

rendimiento. Sin embargo en algunos lugares muy pedregosos por la gran cantidad de piedras reduce la erosión.

**Microcuencas:** Son los afluentes a los ríos secundarios, entiéndase por caños, quebradas, riachuelos que desembocan y alimentan a los ríos secundarios.

**OLADE:** Organización Latinoamericana de Energía.

**PLAMDARH:** Plan Maestro para el Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos.

**Precipitación:** Cualquier y todas las formas del agua, en estado líquido o sólido, que cae de las nubes hasta llegar a la tierra. Esto incluye la lluvia, llovizna, llovizna helada, lluvia helada, granizo, hielo granulado, nieve y granizo menudo.

**Percolación:** Se refiere al paso lento de fluidos a través de los materiales porosos, ejemplos de este proceso es la filtración y la lixiviación. Así se originan las corrientes subterráneas.

**Potencial hidráulico.** Se refiere a la potencia teórica que se puede obtener de un sitio en particular, dicho potencial se basa principalmente en en la densidad del agua, la aceleración de la gravedad y principalmente del salto y del caudal presentes en el sitio de interés.

**QMM es el caudal medio mensual.** Se refiere al caudal promedio presente en un río durante un mes en particular.

**QMA Caudal medio anual.** Se refiere al caudal promedio presente en un río durante un año o varios años.

**Roca:** Se entiende por roca el material que contiene 25 por ciento o más, en volumen, de pedazos de roca mayores de 100mm de diámetro.

**Salto de agua.** Es la distancia vertical medida desde la parte más alta de una cascada hasta el nivel más bajo de la misma, se expresa en metros y es parte fundamental en la determinación del potencial hidráulico.

**SNET:** Servicio Nacional de Estudios Territoriales.

**Temperatura húmeda:** Temperatura del termómetro húmedo es la marcada por un termómetro cuya parte sensible está recubierta de una película de agua ó un pedazo de muselina humedecida y se expone al aire, debe de ser ventilado en forma natural o manual por medio de un aspirador.

**Temperatura seca:** Temperatura marcada por el termómetro ambiente ó seco y que es expuesta al aire, no debe de ser humedecida ni ventilado su bulbo.

**Vertedero:** Estructura que puede utilizarse para controlar el nivel de agua aguas arriba o para medir el caudal o para ambas cosas.

**Zona de convergencia intertropical (ITCZ):** Área en los hemisferios norte y sur donde convergen los vientos alisios, generalmente localizada entre los 10 grados al norte y sur del ecuador. Es una amplia área de baja presión donde tanto la fuerza de coriolis como la baja presión gradual son débiles, permitiendo la formación ocasional de perturbaciones tropicales. Durante el verano en el hemisferio norte, cambia de lugar siguiendo los rayos solares más perpendiculares.

## Fuentes de Consulta

- 1- Manuel Antonio Escamilla Jurado y Remberto Antonio Erazo Ramos. *Uso del agua en sistema de Riegos, en el sur de Ahuachapán*, Proyecto UICN/BASIM. Ahuachapan, El Salvador. Septiembre de 2005; página Web: [IUCN.org/mesoamérica](http://IUCN.org/mesoamérica).
- 2- Mario Enrique Sagastizado Méndez. *El estado de los recursos hídricos en la región hidrográfica Cara Sucia-San Pedro Belén en la zona Sur de Ahuachapán, El Salvador (recopilación y análisis)* / UICN. Centroamérica, El Salvador, 2004; página Web: [IUCN.org/Mesoamérica](http://IUCN.org/Mesoamérica).
- 3- Mauricio Ayala, MARN y Ismael Sánchez, Arturo Escalante, Willian Marroquín, UCA. *Determinación del potencial solar y eólico en El Salvador*. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos naturales (MARN), Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”(UCA), Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET/MARN). San Salvador, El Salvador, Octubre de 2005. Página web: [gis.uca.edu.sv/swera/](http://gis.uca.edu.sv/swera/)
- 4- Nicolás Atilio Méndez Granados. *Análisis de actores de la región hidrográfica Cara Sucia-San Pedro Belén, Ahuachapán*, El Salvador / UICN. Proyecto BASIM. - 1. ed. Centroamérica, El Salvador, 2004; página Web: [www.IUCN.org/Mesoamérica](http://www.IUCN.org/Mesoamérica).
- 5- UNESCO, 2006. *Evaluación de los Recursos Hídricos. Elaboración del balance hídrico integral por cuencas hidrográficas*. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°4. Página web: [www.unesco.org/uy/dspace/bitstream/123456789/1/manual\\_IMTA.pdf](http://www.unesco.org/uy/dspace/bitstream/123456789/1/manual_IMTA.pdf)
- 6- Julio César Quiñónez Basagoitia. *Evaluación de los impactos hidrológicos e hidráulicos asociados a las subcuencas de la planicie costera central de El Salvador. Apéndice III. Aspectos hidrológicos e hidráulicos*. San Salvador, El Salvador. Febrero de 2007.

- 7- Servicio Nacional de Estudios Territoriales Servicio Hidrológico Nacional. *Informe Análisis del comportamiento hídrico en El Salvador. Posibles causas e implicaciones.* San Salvador, El Salvador. Julio 2002.
- 8- Servicio Nacional de Estudios Territoriales: Servicio Hidrológico Nacional; Ing. Adriana Maria Erazo Ch. *Regionalización de caudales máximos y medios en El Salvador.* San Salvador, El Salvador. Febrero de 2007.
- 9- UCA, UPES, UAE. *Mapa Hidrogeológico, validado e integrado por WESA (Water and Earth Science Associates): Santa Ana y Ahuachapán.* ANDA, San Salvador. El Salvador 2011. Pág. Web: [http://www.anda.gob.sv/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&id=11:p&Itemid=115](http://www.anda.gob.sv/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=11:p&Itemid=115); visitada en marzo de 2012.
- 10- Servicio Nacional de Estudios Territoriales . Servicio Hidrológico Nacional. *Balance Hídrico Integrado y Dinámico en El Salvador: Componente Evaluación De Recursos Hídricos.* San Salvador, Diciembre 2005.
- 11- Abel Centella (Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología de Cuba), Luis Castillo (Escuela de Física, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad de El Salvador), Alfredo Aguilar (Escuela de Matemática, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad de El Salvador). *PROYECTO ELS97G32: Escenarios Climáticos de Referencia para la Republica de El Salvador.* San Salvador, julio 1998.
- 12- Programa Salvadoreño De Investigación Sobre Desarrollo Y Medio Ambiente (PRISMA): Nelson Cuéllar y Roberto Duarte. *Boletín 44: Alteración del ciclo hidrológico en El Salvador: Tendencias y desafíos para la gestión territorial.* San Salvador, 2001.
- 13- Ministerio de Cultura y Comunicaciones. *Geografía de El Salvador.* Tomo I. Primera Ed. San Salvador, 1986.

- 14- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales Servicio Nacional de Estudios Territoriales, Lic. Zulma E. Mena. *Diagnostico Nacional de la Calidad de las Aguas Superficiales*. San Salvador, Marzo de 2007.
- 15- Tesis, Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, Carías Juárez, Boris E.; Chacón Novoa, Egly T.; Martínez Márquez, Miguel Á. *Validación de Metodologías para el Cálculo de Caudales Máximos en El Salvador*. San Salvador, Octubre 2004.
- 16- García, Luis. Zimmermann, Ricardo. Soriano, Lorena. Pérez, Carlos. Ayala, Pablo. *Caracterización de Condiciones Meteorológicas en El Salvador*. San Salvador, El Salvador.
- 17- Tesis Posgrado, Universidad de Costa Rica, Luis Alberto García Guirola.  
*Régimen de Lluvia Y Caudales en El Salvador, su Relación con la Variabilidad Climática (Forzantes Oceánicas-Atmosféricas) para la Construcción de Mapas de Amenazas por Déficit o Exceso de Lluvias*. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica. 2009.
- 18- SNET. *Manejo Integrado de cuencas asociadas al complejo hidrográfico Barra de Santiago –El Imposible*. (Proyecto BASIM), Ahuachapán. El Salvador, 2005.
- 19- Patrind Hidropower Project. *Environmental Impact Assessment*. Star Hidropower LTD. June 2010.
- 20- Diego García de Jalón Lastra. *Método de caudales ecológicos con valoración de hábitat*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes Universidad Politécnica de Madrid 2009.
- 21- SNET. *Escenario de impacto por reducción de caudales en la época seca*. Diciembre 2004 - abril de 2005. El Salvador.

22- Nelson Cuéllar, V. Ernesto Méndez, Silvia de Larios, Leopoldo Dimas y Herman Rosa. *Tendencias y perspectivas del sector forestal en El Salvador del Siglo XXI*. PRISMA. San Salvador, Octubre de 2003

**Páginas Web:**

23- <http://es.wikipedia.org/wiki/Jujutla>; visitada en marzo de 2012.

24- [http://www.anda.gob.sv/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&id=11:p&Itemid=115](http://www.anda.gob.sv/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=11:p&Itemid=115); visitada en marzo de 2012.

25- [www.vlh-turbine.com](http://www.vlh-turbine.com); visitada en marzo de 2012.

26- [www.rickly.com](http://www.rickly.com); visitada en marzo de 2012.

# ANEXOS

**Anexo 1.1:** Datos climáticos y Geológicos del País.

**Anexo 1.2:** Mapas de Precipitación, medias mensual y anual del país.

**Anexo 2:** Mapas de Evapotranspiración de Referencia (promedia mensual, anual), cambio de almacenamiento y escorrentía superficial.

**Anexo 3:** Mapas de anomalías de lluvia en isoyetas de los escenarios secos y lluviosos.

**Anexo 4:** Tabla de relaciones normalizadas para la medición de velocidad con medidor de corrientes de agua, de Instrumentos hidrológicos Rickly.

**Anexo 5:** Ley de incentivos fiscales para el fomento de las energías renovables en la generación de electricidad.

**Anexo 6:** Normativas y legislación relativas a los Recursos hídricos en El Salvador.

**Anexo 7:** Características de una turbina Ossberger.