



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN
ENERGÍAS RENOVABLES**

TESIS

**“METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL
POTENCIAL HÍDRICO EN CUENCAS A TRAVÉS DE
MÉTODOS INDIRECTOS.”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN MATERIALES Y SISTEMAS
ENERGÉTICOS RENOVABLES**

PRESENTA

JUAN CARLOS NAVARRO ESCOBAR

DIRECTOR

DR. PASCUAL LÓPEZ DE PAZ

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Marzo de 2018

**Dedicado con amor profundo y sincero a Judith mi
compañera de vida a mis hijos David Emmanuel y Elea,
a mis padres y hermanos. A todos ellos; con humildad y
gratitud infinita en el alma y el corazón les agradezco
por estar a mi lado... ¡siempre!**

AGRADECIMIENTOS A:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por las facilidades económicas para la
realización del presente trabajo de investigación.

Al Dr. Pascual López De Paz director de esta tesis por su guía, enseñanzas y constante e
incondicional apoyo.

Al Ing. Mauricio José Ríos, por los buenos consejos y su gran apoyo en la enseñanza de los Sistemas
de Información Geográficos.

Al Dr. José Zambrano Solís † por todo el apoyo brindado en la realización de este proyecto, hasta
donde se encuentre va este agradecimiento.

Al cuerpo académico del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, por el gran
aporte a la formación profesional y humana a lo largo de este trayecto.

Y a los entrañables amigos de la generación 2016 – 2018 de la Maestría en Materiales y Sistemas
Energéticos Renovables.

Índice.

Índice.	3
Prologo.	11
¿A quién le pertenece el agua?	11
Resumen	16
Capítulo [I] Antecedentes.	18
1.1 Introducción.	18
1.1.1 Aspectos Generales.	18
1.1.2 Aspectos particulares.	21
1.2 Problemática.	22
1.3 Referentes Actuales.	23
1.4 Objetivos.	25
1.4.1 Objetivo General.	25
1.4.2 Objetivos Particulares.	25
Capítulo [II] Fundamentos Teóricos.	27
2.1 Introducción.	27
2.2 Precipitación y sus mediciones	27
2.3 Análisis de los datos de precipitación.	31
2.3.1 Lluvia media.	31
2.3.1.1 Método aritmético.	31
2.3.1.2 Polígonos de Thiessen.	32
2.3.1.3 Método de las isoyetas	33
2.3.2 Curva masa media.	34

2.3.3	Curvas de intensidad duración periodo de retorno (i-d-T)	36
2.3.3.1	Algunos conceptos de probabilidad y estadística.	36
2.4	Relaciones lluvia - escurrimiento.	37
2.4.1	Método de envolventes.	38
2.4.2	La fórmula racional.	39
2.4.3	Hidrograma unitario.	42
2.5	Probabilidad y estadística en hidrología.	44
2.5.1	Distribuciones de probabilidad para las variables hidrológicas.	45
2.5.2	Distribución normal.	46
2.5.3	Distribución log-normal.	46
2.5.4	Distribución exponencial.	47
2.5.5	Distribución gamma.	47
2.5.6	Distribución Pearson tipo III.	48
2.6	Generalidades de un Sistema de Información Geográfica (SIG).	49
2.6.1	Ventajas y desventajas de un SIG.	52
2.7	Sobre el programa de computo Quantum Gis (QGIS).	53
2.7.1	Complementos computacionales para hidrología.	55
2.8	Desarrollo de herramientas y casos de estudio para el manejo de SIG en Latinoamérica y México.	56
2.8.1	HIDROSIG: un sistema de información geográfica para la gestión de recursos naturales y modelación del medio ambiente [22].	57
2.8.2	Desarrollo de herramientas ArcGIS para el cálculo de indicadores físicos y socio- económicos en cuencas hidrográficas [24].	58
2.8.3	Sistema de Información Geográfica para las Energías Renovables (SIGER) en México [25].	59
2.8.4	Herramientas de SIG para el cálculo de indicadores poblacionales en cuencas Hidrográficas[26].	61

2.8.5 Atlas nacional de zonas con alto potencial de energías limpias – inventario nacional de energías renovables (INERE) [27].	62
Capítulo [III] Metodología.	64
3.1 Introducción.	64
3.2 Determinación del área de estudio (Estudio geomorfológico).	65
3.3 Datos de precipitación y su análisis.	68
3.3.1 Precipitaciones máximas extraordinarias.	68
3.3.2 Tratamiento de los datos de precipitación.	72
3.4 Análisis de los casos particulares (zonas de estudios).	77
3.4.1 Descripción geomorfológica Micro-cuenca el Chiflón (zona de estudio)	78
3.4.2 Obtención del caudal.	83
3.4.3 Completado de datos de precipitación faltantes.	88
3.5 Interpretación del error estándar.	101
3.6 El cálculo de los tiempos de retorno.	104
3.7 Fórmula para el cálculo de la Potencia en corrientes hidráulicas.	107
Capítulo [IV] Resultados	108
4.1 Análisis de los resultados de los métodos estadísticos hidrológicos.	108
4.2 Relación Precipitación – Caudal.	114
4.3 Hidrograma base (forma del hidrograma).	115
4.4 Coeficiente de escurrimiento por el método de los números de escurrimiento.	118
4.5 Criterio de selección de los caudales para los objetivos buscados.	122
4.5.1 Criterio de selección de los caudales la generación eléctrica (potencial hidrológico).	126
4.6 Comparación de Resultados.	129

4.7 Conclusiones.	133
A. Anexos.	135
A.1 Recomendaciones y trabajos próximos.	135
a.1. Recomendaciones.	135
a.2. Trabajos próximos.	136
A.2 Mapas y resultados.	137
1. Zona de estudio “El Hular”.	138
1.1 Mapa de Ubicación y geomorfología.	138
1.2 Resultados de los análisis estadísticos de precipitación y Caudales de estudio.	139
Caudal para el diseño de la infraestructura.	140
Caudal para la obtención del potencial hidráulico.	141
Resumen de la obtención de los caudales para la proyección.	141
2. Zona de estudio “San Andrés Puerto Rico”.	142
2.1 Mapa de Ubicación y geomorfología.	142
2.2 Resultados de los análisis estadísticos de precipitación y Caudales de estudio.	143
Caudal para el diseño de la infraestructura.	144
Caudal para la obtención del potencial hidráulico.	145
Resumen de la obtención de los caudales para la proyección.	145
3. Zona de estudio “Malpaso”.	146
3.1 Mapa de Ubicación y geomorfología.	146
3.2 Resultados de los análisis estadísticos de precipitación y Caudales de estudio.	147
Caudal para el diseño de la infraestructura.	148
Caudal para la obtención del potencial hidráulico.	149
Resumen de la obtención de los caudales para la proyección.	149
4. Zona de estudio “La Angostura”.	150
4.1 Mapa de Ubicación y geomorfología.	150
4.2 Resultados de los análisis estadísticos de precipitación y Caudales de estudio.	151

Caudal para el diseño de la infraestructura. _____	152
Caudal para la obtención del potencial hidráulico. _____	153
Resumen de la obtención de los caudales para la proyección. _____	153
5. Zona de estudio “Grijalva”. _____	154
5.1 Mapa de Ubicación y geomorfología. _____	154
5.2 Resultados de los análisis estadísticos de precipitación y Caudales de estudio. _____	155
Caudal para el diseño de la infraestructura. _____	156
Caudal para la obtención del potencial hidráulico. _____	157
Resumen de la obtención de los caudales para la proyección. _____	157
Bibliografía. _____	158

Índice de figuras.

Figura II.1 Pluviómetro graduado.....	28
Figura II.2 Pluviografo.....	28
Figura II.3 Curva masa de precipitación.....	30
Figura II.4 Gráfica de precipitación acumulada.....	30
Figura II.5 Hietograma de intensidades.	30
Figura II.6 Hietograma de alturas de precipitación.	30
Figura II.7 Polígono de Thiessen.	32
Figura II.8 Método de las isoyetas.	33
Figura II.9 Curva masa de precipitación.....	35
Figura II.10 Hipótesis fundamental de la formula racional.....	39
Figura II.11 Tiempo de concentración.	40
Figura II.12 Representación de la precipitación a la salida de la cuenca.....	43
Figura II.13 Representación de un sistema de información geográfico SIG.....	51
Figura III.1 Estaciones meteorológicas y zonas de estudio.	67
Figura III.2 Clasificación de los datos.....	74
Figura III.3 Enfoque de un proyecto hidráulico convencional.....	77

Figura III.4 Mapa de la zona de estudios “El Chiflón” y sus estaciones meteorológicas de influencia.	78
Figura III.5 Zona de estudio El Chiflón.	79
Figura III.6 Datos geomorfológicos El Chiflón.	82
Figura III.7 Correlación lineal por el método de correlación lineal directa.	94
Figura III.8 Correlación lineal por el método de Pearson.	95
Figura III.9 significación y bondad de ajuste.	96
Figura III.10 Pantalla AX.exe para abrir archivos.	97
Figura III.11 Pantalla AX.exe ajustes de función.	98
Figura III.12 Errores estándar de precipitación.	99
Figura III.13 Tiempos de retorno de precipitación.	100
Figura IV.1 Distribución de los errores estándar.	103
Figura IV.2 Errores estándar y sus intervalos.	104
Figura A.1 Zona de estudio “El Hular” información geomorfológica.	138
Figura A.2 Zona de estudio “San Andrés” información geomorfológica.	142
Figura A.3 Zona de estudio “Malpaso” información geomorfológica.	146
Figura A.4 Zona de estudio “La Angostura” información geomorfológica.	150
Figura A.5 Zona de estudio “Grijalva” información geomorfológica.	154

Índice de gráficas.

Gráfica III.1 Registro de precipitaciones en las zonas de estudio.	69
Gráfica III.2 Distribución Boxplot de las precipitaciones por cuenca.	73
Gráfica III.3 Precipitaciones por clases.	75
Gráfica III.4 Distribución de las precipitaciones por clases.	76
Gráfica III.5 Perfil de la corriente principal El Chiflón.	80
Gráfica III.6 Curva hipsométrica El Chiflón.	81
Gráfica III.7 Precipitaciones por estación en la cuenca El Chiflón.	84
Gráfica III.8 Distribución de los eventos de la cuenca El Chiflón (Boxplot).	85
Gráfica III.9 Distribución de los eventos homogeneizados.	86
Gráfica III.10 Distribución de las densidades de precipitación por clases.	87

Gráfica III.11 Correlación entre estaciones de la cuenca datos sin tratar.....	88
Gráfica III.12 Correlación de eventos de precipitación con tratamiento.....	91
Gráfica III.13 Correlaciones significativas.....	93
Gráfica IV.1 Tiempos de retorno de la precipitación de los valores máximos.	110
Gráfica IV.2 tiempos de retorno de las precipitaciones de los valores medios.....	111
Gráfica IV.3 Fluctuación de los errores estándar en la muestra general.	113
Gráfica IV.4 Hidrograma unitario resultante.....	117
Gráfica IV.5 Caudales para los diferentes tiempos de retorno.....	121
Gráfica IV.6 Selección del periodo de retorno según la infraestructura.....	125
Gráfica IV.7 Selección de caudales para el potencial hidráulico.	127
Gráfica IV.8 Comparación de caudales por métodos indirectos.....	132
Gráfica A.1 Caudales estimados hasta periodos de retorno de 1000 años.....	139
Gráfica A.2 Caudales para la obtención del diseño de infraestructura y el potencial hidráulico.....	140
Gráfica A.3 Caudales estimados hasta periodos de retorno de 1000 años.....	143
Gráfica A.4 Caudales para la obtención del diseño de infraestructura y el potencial hidráulico.....	144
Gráfica A.5 Caudales estimados hasta periodos de retorno de 1000 años.....	147
Gráfica A.6 Caudales para la obtención del diseño de infraestructura y el potencial hidráulico.....	148
Gráfica A.7 Caudales estimados hasta periodos de retorno de 1000 años.....	151
Gráfica A.8 Caudales para la obtención del diseño de infraestructura y el potencial hidráulico.....	152
Gráfica A.9 Caudales estimados hasta periodos de retorno de 1000 años.....	155
Gráfica A.10 Caudales para la obtención del diseño de infraestructura y el potencial hidráulico.....	156

Índice de tablas.

Tabla II.1 Tiempo de concentración.	41
Tabla II.2 Componentes y características que debe componer un SIG.....	51
Tabla II.3 Preguntas que debe responder un SIG.....	52
Tabla II.4 Ventajas y desventajas de un SIG	52
Tabla III.1 Clasificación de las zonas de estudio.	67
Tabla III.2 Registro de precipitaciones para el ejemplo.....	71

Tabla III.3 Registro de precipitaciones para el ejemplo con evento máximo.....	71
Tabla III.4 Correlación de los eventos de precipitación sin tratamiento.	90
Tabla III.5 Correlación de los eventos de precipitación con tratamiento	92
Tabla IV.1 Distribución de los intervalos del error estándar.....	111
Tabla IV.2 Valores geomorfológicos para la estimación del caudal.	115
Tabla IV.3 Hidrograma sintético unitario.....	116
Tabla IV.4 Valor N para la cuenca según USCS	118
Tabla IV.5 Tabla de cálculo del caudal según precipitación.....	120
Tabla IV.6 Selección del periodo de retorno según la infraestructura.	124
Tabla IV.7 Valores de los caudales según tiempo de retorno.	125
Tabla IV.8 Valores de caudales según tiempo de retorno de 10 y 20 años.....	128
Tabla IV.9 Caudal para la determinación del potencial hidráulico.	128
Tabla IV.10 Tabla de valores obtenidos por el método sección – pendiente.	129
Tabla A.1 Caudal de diseño para la infraestructura por los diversos métodos.....	140
Tabla A.2 Caudal para la determinación del potencial hidráulico.....	141
Tabla A.3 Caudales para la elaboración de anteproyectos de electrificación.....	141
Tabla A.4 Caudal de diseño para la infraestructura por los diversos métodos.....	144
Tabla A.5 Caudal para la determinación del potencial hidráulico.....	145
Tabla A.6 Caudales para la elaboración de anteproyectos de electrificación.....	145
Tabla A.7 Caudal de diseño para la infraestructura por los diversos métodos.....	148
Tabla A.8 Caudal para la determinación del potencial hidráulico.....	149
Tabla A.9 Caudales para la elaboración de anteproyectos de electrificación.....	149
Tabla A.10 Caudal de diseño para la infraestructura por los diversos métodos.....	152
Tabla A.11 Caudal para la determinación del potencial hidráulico.....	153
Tabla A.12 Caudales para la elaboración de anteproyectos de electrificación.....	153
Tabla A.13 Caudal de diseño para la infraestructura por los diversos métodos.....	156
Tabla A.14 Caudal para la determinación del potencial hidráulico.....	157
Tabla A.15 Caudales para la elaboración de anteproyectos de electrificación.....	157

Prologo.

¿A quién le pertenece el agua?

Escribía Vandana Shiva en su libro *Las guerras del agua – privatización, contaminación y lucro* [1] Recientemente, mientras viajaba a Jaipur, capital de Rajasthan, en la India Occidental, para asistir a una audiencia pública sobre sequía y hambruna, tuve el choque frente a las dos culturas del agua. En el tren de Delhi a Jaipur nos sirvieron agua embotellada, de una marca conocida perteneciente a una gran compañía transnacional. En las calles de Jaipur había otra cultura del agua. En el momento más difícil de la sequía, se instalaron pequeñas chozas techadas llamadas Jal Mandaris (templos del agua) para proporcionar agua gratis en júcaras a los sedientos. Los Jal Mandaris son parte de la antigua tradición de colocar Piyas, puestos en lugares públicos en donde se da agua gratuitamente. Lo anterior ejemplifica un choque entre dos culturas: una que ve el agua como algo sagrado y considera su suministro como una obligación para preservar la vida, y otra que la considera como una mercancía cuya propiedad y comercio son derechos corporativos fundamentales. La cultura de la mercantilización está en guerra con las diversas culturas que comparten, reciben y dan agua gratuitamente. La cultura insostenible, no renovable y contaminante del plástico está en guerra con las civilizaciones basadas en la tierra, el barro y las culturas de renovación y crecimiento.

Se inicia este trabajo con el párrafo anterior para enmarcar unos de los propósitos que no hay que eludir, ni pasar desapercibido, más allá del mérito o valor científico e investigativo que pueda tener este, la intención es la de concientizar a aquellos que por interés o necesidad se encuentren leyendo estas líneas; se habla de concientizar en varios sentidos, que varían en sus enfoques así como variantes diversas en aplicaciones y usos tiene el agua por su naturaleza, concientizar desde el aspecto social, ecológico, de aprovechamiento, cooperación y sobre todo desde

el aspecto humano, ya que para casi cualquier actividad humana el uso del agua es simplemente necesaria.

Con lo anterior y sin demeritar su contenido científico, esta investigación pretende exponer algunos métodos para estimar las capacidades, volúmenes y caudales hidráulicos obtenidos a través de estimaciones estadísticas de las lluvias para aplicaciones específicamente de micro-generación eléctrica, sin dejar de lado que la metodología propuesta puede ser útil para diversas aplicaciones como el riego, el almacenamiento, obras de abastecimiento de agua potable, entre otras.

Se hace hincapié en el propósito principal del trabajo de investigación que es de carácter científico, sin embargo, es preciso poner en contexto que de nada sirve la propuesta científica del mismo, sin un objetivo social, desde un punto de vista muy personal, de poco sirve hacer ciencia (si es que este trabajo pudiera jactarse de eso), si no tiene como objetivo último el de servir a la mejora de las condiciones de vida del ser humano, en algún sentido.

En estos tiempos en donde se expone a la vista soluciones más amigables para el planeta y la humanidad si de energía hablamos, el uso de energías renovables se sustenta en la búsqueda que diversos campos de la investigación científica para mejorar y optimizar el mejor el aprovechamiento de los recursos naturales que tenemos a disposición, sin embargo, a modo de otra percepción personal, pareciera ser que esta búsqueda del mejoramiento científico y tecnológico, se está transformando en una carrera en la que todos quieren llegar en busca del reconocimiento y el galardón e inclusive de preponderar a algunas ramas científicas sobre otras por su rigor científico, olvidando la cooperación entre sus diversas ramas y los aspectos de impacto social colateral que sus trabajos conllevan.

Para contextualizar esta visión del uso de las energías renovables, en eventos anteriores como la llamada revolución verde que se dio entre los años 1960 y 1980, cuyo objetivo principal era el incrementar la productividad agrícola, para disminuir la hambruna a nivel mundial, y la cual se deformato, precisamente por no tomar en cuenta los aspectos sociales colaterales que toda esta

“revolución” conllevaría, principalmente por causa de las políticas que beneficiaban a ciertos intereses económicos de un pequeño grupo, algo en similar ocurre en la actualidad, sin ir más lejos con la reforma energética promulgada durante este sexenio en México (2014 - 2018).

Del texto *The Violence of the Green Revolution* [2], a continuación, se extraen algunas partes que considero son importantes para poner en un panorama un tanto similar, esta nueva revolución sobre el uso de las energías renovables.

La revolución verde ha sido premiada como con logro político y tecnológico sin precedentes en la historia de la humanidad. Esta fue diseñada como una estrategia de paz, a través de la creación de la abundancia, quebrando los límites y variabilidad de la naturaleza. En su misma génesis, la ciencia de la revolución verde se presentó como un proyecto político para la creación de un orden social basado en la paz y la estabilidad, Sin embargo cuando la violencia fue el resultado de la ingeniería social, el dominio de la ciencia quedó artificialmente aislada del dominio de la política y los procesos sociales. La ciencia de la revolución verde ofertó una “milagrosa” receta para la prosperidad. Pero cuando el descontento y las nuevas carencias fueron emergiendo, la ciencia fue deslindada del proceso económico.

“Mientras que la ciencia por sí misma es el producto de los esfuerzos sociales y tiene una agenda social determinada por aquellos que pueden movilizar la producción científica, en los tiempos contemporáneos la actividad científica ha sido asignada a una posición epistemológica privilegiada convirtiéndose en social y políticamente neutral. Así la ciencia toma un carácter dual, esta ofrece soluciones tecnológicas a problemas sociales y políticos, pero se deslinda así misma de los nuevos problemas sociales y políticos que crea a partir de la misma solución, reflejando las prioridades y percepciones de una clase particular, género o intereses culturales, el pensamiento científico transforma el orden cultural y social; Sin embargo ya que ambos, naturaleza y sociedad tienen su propia organización, la imposición de un nuevo orden sobre ellas no se realiza de manera perfecta ni dócil. Algunas veces la resistencia de las personas y la naturaleza, es una resistencia que se externaliza

como “efectos anticipados colaterales”. La ciencia se mantiene inmune de la evaluación social y aislada de sus propios impactos. A través de esta división de identidades es creada la “santidad” de la ciencia”.

“Dentro de la estructura de la ciencia, en sí misma tiene características de percibir y prevenir vínculos. Fragmentándose en estrechas disciplinas y categorías reduccionistas, el conocimiento científico ha tenido un punto ciego, respecto a propiedades de relaciones e impacto. Esto tiende a descontextualizar su propio contexto. A través de procesos de descontextualización, los impactos negativos y destructivos de la ciencia sobre y la sociedad son externalizados y se hacen visibles. Siendo separada de su material y raíces políticas en el sistema de la ciencia, nuevas formas de carencia y conflicto social son ligados a otros sistemas sociales, como por ejemplo la religión”.

Sin embargo, no hay peor intento que el que no se hace, este (si se puede llamar así) nuevo movimiento para el aprovechamiento de las fuentes naturales y de las energías renovables para el beneficio de la humanidad, tienen un carácter benéfico y bondadoso para la humanidad, de eso no queda ninguna duda, solamente hay que estar atentos (dadas las experiencias pasadas relatadas en los párrafos anteriores) a las legislaciones de políticas que solo pretenden beneficiar a unos cuantos, los más poderosos; la ciencia tiene que fundamentar bien su comprensión de la naturaleza, su técnica, su teoría y su práctica pero a su vez siempre debe tener un ojo crítico y analítico de las entidades externas a ella que pretenden controlar los avances científicos para beneficio propio perjudicando la razón principal del porqué de la ciencia. El beneficio de la humanidad.

Para finalizar, enfatizamos algo que escribiera Kapitsa [3] – A menudo me parece como si en el ambiente científico se temieran los debates y determinadas valoraciones. Puede ser que esto sea así porque todavía nos encontramos con el falso amor propio basado en una incorrecta concepción de que un buen científico no puede equivocarse, o de que un error puede desacreditarlo. A veces olvidamos aquello de que *“sólo no se equivoca quién nada hace”*. Y es que cualquier verdad científica en el día de hoy, mañana puede ser complementada o cambiada ya que nos encontramos en un

estado de continuo acercamiento al conocimiento de la verdadera naturaleza de las cosas. Sólo superando error tras error, aclarando contradicciones, obtenemos una solución más cercana del problema planteado. Los errores no son todavía pseudociencia. Pseudociencia es el no reconocimiento de los errores. Sólo por esto ella es un freno para el adecuado desarrollo de la ciencia.

Lo descrito en el anterior párrafo no es para, como dice el viejo adagio “curar en salud” este trabajo, sino más bien para ponerlo en perspectiva de que esté, pretende alcanzar cierta relevancia solo a través del debate constructivo, y que a pesar de ser un intento por describir un aspecto del comportamiento de una entidad de la naturaleza, quizá desde alguna perspectiva esté pueda parecer limitado o sin rigor propiamente científico, está siempre a objeción de ser complementado o criticado, en aras de complementarse y lograr el objetivo propuesto.

Resumen

En México, el 80% de la energía renovable es producida por fuentes hidráulicas, de las cuales Chiapas aporta el 54% de esa energía a través de sus centrales hidroeléctricas, además concentra el 34% de la esorrentía de agua dulce de todo México [CONAGUA]. En este contexto de disponibilidad de recursos naturales, es incomprensible que no se aproveche este potencial para beneficio de las personas que carecen de servicio eléctrico.

Por otro lado, la desigualdad social que se vive en Chiapas es evidente, los datos más actuales hasta 2014 indican que hay 10,126 comunidades sin electrificación, el 76% de la población vive en pobreza y el 31,8% vive en extrema pobreza [CONEVAL]. Significa que carecen de los servicios básicos para vivir como es el servicio eléctrico.

Cabe hacer énfasis en el hecho de que los asentamientos humanos instintivamente buscan residir cercanos a recursos naturales que provean la comodidad para su existencia siendo uno de los más importantes los escurrimientos naturales de agua como son los ríos. Aquí radica la importancia del enfoque del presente trabajo y su relación directa entre la parte tecnológica y social.

En la actualidad, no existe un plan o programa regional que utilice energía hidráulica en el estado de Chiapas para aplicaciones tales como la generación de electricidad a pequeña escala, de ser posible esto ayudaría a resolver los problemas mencionados en los párrafos anteriores.

El objetivo de este trabajo es determinar el potencial hídrico indirectamente para su aplicación en la micro- eléctrica a través de una metodología que une la identificación de áreas de interés con potencial de generación a través de modelos digitales de elevación y registros históricos de precipitaciones meteorológicas estaciones para determinar la influencia de las lluvias en la esorrentía de las cuencas analizadas.

Teniendo 6 áreas de estudio identificadas, de las cuales 4 son de control para ajustar esta metodología, las cuencas hidrológicas de interés se identifican a través de modelos digitales de elevación (MDE) y de allí sus características morfológicas, una vez identificadas accedemos a las bases de datos de las estaciones meteorológicas disponibles en la zona de estudio y realizar un análisis estadístico de los datos históricos de precipitación para obtener los datos representativos de estos, lo que nos permitirá obtener el flujo teórico que pasará a través de la corriente principal de la cuenca en el análisis y después de que para obtener el potencial de agua para aplicarlo a la micro generación de forma rápida y remota desde el área de interés, siendo esta una opción interesante para la toma de decisiones.

Capítulo [I] Antecedentes.

1.1 Introducción.

“Una hormiga solitaria es una desilusión, solo descubres que pueden hacer cuando entiendes cómo funcionan en la colonia”. – E.O. WILSON

1.1.1 Aspectos Generales.

Una de las problemáticas fundamentales en el desarrollo integral de los países y por consecuencia de las comunidades es la problemática energética, siendo la energía eléctrica un factor preponderante y necesario a la cual se le atribuye el progreso de nuestras comunidades, pueblos y ciudades. La importancia del enfoque y profundización de este trabajo de investigación radica en encontrar un mecanismo que agrupe de manera integral, los aspectos técnicos importantes y primordiales para la generación de energía a través del aprovechamiento de las fuentes hidráulicas del estado, sin olvidar el contexto primordial que responde a la siguiente pregunta ¿hacia quien va enfocado este servicio?, el usuario final, los habitantes de la comunidad.

El desarrollo de las comunidades, son clara consecuencia de la desigualdad social a la que están expuestas, la inequidad de condiciones sociales dignas como la vivienda, salud, alimentación, educación etc. van modelando la evolución a través del tiempo de las mismas y de ahí provienen el nivel lento de crecimientos de nuestras comunidades.

En el contexto actual de sustentabilidad, la generación de energía renovable puede ayudar a las comunidades a alcanzar sus metas de desarrollo a través de la provisión y el acceso limpio, seguro, confiable y asequible de energía. La energía renovable se ha convertido en una tendencia principal, agrupando la mayoría de la capacidad de las fuentes que producen energía hoy en día. Decenas de giga watts de energía eólica, solar y fotovoltaica han sido instaladas alrededor del mundo cada año, el mercado de las energías renovables vale más de cien mil millones de dólares anualmente. Otros mercados de generación de energía renovable también han ido emergiendo. En años recientes se ha observado un dramático descenso en los costos de las tecnologías de energías renovables como resultado de la I + D y su despliegue acelerado.[4]

A través de la historia, el hombre empezó a moverse hacia adelante desarrollándose a través del aprendizaje, de sus fracasos y éxitos; aprendizaje obtenido de la experiencia propia y la de otros. Aún en muchas áreas de nuestra sociedad actual seguimos aprendiendo de las experiencias, nada está escrito, ni es definitivo, aún en estos tiempos en donde los avances tecnológicos representan una ventaja, evitamos las evaluaciones como herramientas apropiadas para manejar situaciones complejas e interdisciplinarias.

Las razones a menudo tomadas en cuenta, incluyen la imposibilidad de comparar diferentes áreas geográficas y diferentes campos de la ciencia para todos los proyectos y situaciones – En otras palabras – La imposibilidad de comparar peras con manzanas. Cada tipo de problemática, organización, electrificación rural o proyecto para la sustentabilidad tiene características especiales y su comparación no es necesariamente sencilla. El acceso a los servicios básicos como la energía eléctrica es esencial para el desarrollo sostenible y la reducción de la pobreza. Mucha gente alrededor del mundo aún carece de fuentes de energías modernas, como la electricidad, como en la mayoría de las áreas rurales de los países en desarrollo. “*La abolición de monopolios para la generación de energía eléctrica y la distribución, en muchos países en desarrollo ha incrementado en número y abre posibilidades de opciones para una nueva organización en los servicios de generación eléctrica*”. Un importante problema es sin embargo, si la electrificación rural implementada por empresas privadas

u otras organizaciones no gubernamentales contribuyen más efectivamente al desarrollo sostenible, desde la aproximación convencional donde la electrificación rural es responsabilidad del gobierno en turno. [5]

Una revisión sobre los proyectos de accesos a la electricidad en áreas rurales revela un número de características de insostenibilidad. Cada área rural puede ser muy diferentes con respecto a sus condiciones socioeconómicas y a la dinámica entre sociedad y tecnología. La evaluación de los proyectos de sustentabilidad está basada en indicadores de desarrollo sostenible para la electrificación rural, considerando aspectos técnicos, económicos, sociales, ambientales y de sustentabilidad institucional.[6]

Uno de los problemas en los proyectos de electrificación rural es saber cuál de las tecnologías de generación es la más apropiada para cada caso. Estos requerimientos junto con el conocimiento técnico y el conocimiento a profundidad de la demanda de recursos disponibles en la región por electrificar, además de los aspectos económicos y sociales siempre deben ser tomados en cuenta[7].

Durante nuestros días, asistimos al renacer de las fuentes de energía renovables: eólica, hidráulica, solar, biomasa... abandonadas por esta civilización desde la aparición del petróleo; ahora comienzan a recobrar toda la importancia que se merecen. Estas fuerzas son las que la humanidad utilizó a lo largo de la historia para cubrir sus necesidades. Las energías renovables son inagotables, limpias e invitan a utilizarlas de forma descentralizada y autogestionaria. (Lus, 1983)

¿Desde qué posición podemos tener un panorama más amplio para saber que tenemos la capacidad de encarar un proyecto de electrificación de ciertas magnitudes?

En 2010, la energía proveniente de fuentes renovables suministró 16.7% del consumo final de energía, considerándose como fuentes renovables a la biomasa tradicional, a las grandes

hidroeléctricas, así como a las llamadas “nuevas” energías renovables, tales como pequeñas centrales hidroeléctricas, bioenergéticos, energía eólica, solar y geotérmica. En 2011, la capacidad mundial instalada de las fuentes de energía renovable se estimó en 1,360 giga watts (GW), alrededor de 8% más de lo registrado en 2010, lo que la llevó a representar aproximadamente un cuarto de la capacidad global instalada (estimada en alrededor de 5,360 GW en 2011) y alrededor del 20.3% del suministro global de energía eléctrica [8].

1.1.2 Aspectos particulares.

Actualmente, el estado de Chiapas es el más pobre del país con un 76.2% de pobreza y dentro del cual el 31.8% es pobreza extrema¹; en donde está por demás decir que toda esta condición de pobreza extrema se debe a muchos factores no solo el económico sino también se debe a la carencia de servicios a los que la sociedad en general debe tener acceso como parte de un bien fundamental y básico de los seres humanos.

Estos bienes fundamentales están clasificados por la INEGI como “*indicadores de carencia social*” clasificados dentro de esos indicadores tenemos a algunos como: rezago educativo, carencia a servicios de salud, carencia a la seguridad social, carencia a calidad de espacios y viviendas, carencia de servicios básicos en la vivienda, carencia por acceso a la alimentación etc...

El hecho de que más de 10,126 comunidades en el estado, están sin electrificar y a grandes rasgos, sin pretender este ser el argumento principal de la problemática sobre el cual descansará el contenido de la presente investigación, es importante tener en cuenta siempre el hecho de que la investigación y la tecnología no solo deben cubrir un aspecto de enriquecimiento al contenido científico de cierta área de estudios sino paralelamente también se debe cubrir el hecho de que la ciencia y la tecnología debe brindar un bien común, un bien de carácter tangible que ayude a

¹ Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), México 2015

solventar un problema de la sociedad en general, pero poniendo mayor énfasis en la sociedad desprovista de oportunidades y mecanismos que la acerquen un poco a un nivel de confortabilidad y estabilidad social mínimo.

1.2 Problemática.

En la actualidad, el estado de Chiapas no cuenta con algún plan público o gubernamental para fomentar el aprovechamiento del recurso hidráulico para la generación eléctrica a micro escala, esto derivado a que el estado cuenta con cuatro grandes presas hidroeléctricas que suministran la mayor parte de la energía eléctrica y también a que muchos de los afluentes perennes son de difícil acceso por estar en comunidades remotas, otro aspecto es que este tipo de carecen de importancia a los propósitos mercantiles porque no son un negocio que redituará grandes ingresos económicos, pero en resumen se puede decir que el gran problema es que existe indiferencia por encarar este tipo de proyectos y ayudar a las comunidades más desprotegidas

Por lo tanto, en este trabajo se utilizaran los registros de las precipitaciones censadas disponibles en puntos cercanos a la cuenca identificada que nos permitirá de manera remota simular las condiciones de precipitación en ciertas regiones de interés para estimar determinar el potencial hidrológico. Ya que no existe una metodología que combine la obtención de datos geomorfológicos de forma remota y el análisis de precipitaciones de forma estadística, que en combinación nos ayudan a determinar el potencial hidráulico.

La motivación del presente trabajo se justifica el hecho de que la metodología propuesta permite simular de manera remota condiciones de precipitación y como consecuencia de ello la obtención del potencial hídrico, en comparación a los aforos realizados en campo, los tiempos y costos, tanto de análisis y de fuerza de trabajo son muy pequeños, los datos para el análisis tanto de morfología de la zona de estudio y el análisis de precipitaciones son de libre acceso, al igual que el software utilizado para el procesamiento es de acceso libre y una de las motivaciones principales es

que la presente metodología es aplicable para cualquier zona siempre y cuando cuente con información disponible.

1.3 Referentes Actuales.

- En el artículo publicado por la Fundación Solar y el ministerio de energía en el 2013 y minería del gobierno de Guatemala, recoge los resultados de los proyectos desarrollados a través del programa PURE (Proyecto de Usos Productivos de la Energía Renovable en Guatemala)[9].

Dentro de las acciones, de la Fundación Solar ha acompañado a las comunidades rurales aisladas, sin acceso a energía eléctrica proveniente de la red interconectada nacional, en procesos para la gestión e implementación de centrales hidroeléctricas de pequeña escala, tanto aislado como potencial de conexión. Esto es con el objeto de reducir emisiones de gases de efecto invernadero a través de la promoción de los usos productivos de la energía renovable y beneficiar a familias de las áreas rurales más pobres en varios municipios de los departamentos de Alta Verapaz, Baja Verapaz, El Quiché, San Marcos y Huehuetenango.

La gestión e implementación de proyectos de centrales hidroeléctricas de pequeña escala, dentro del PURE, han fomentado la remoción de barreras para la adopción de tecnologías de energía renovable, contribuyendo a la reducción de la pobreza en las áreas de intervención a través de los usos productivos de la energía renovable e incrementando y estimulando las nuevas alternativas de emprendimientos comunitarios y municipales.

- Luis Real Monterroso en su publicación Micro y mini hidroeléctricas en pequeñas comunidades de 2017 [10] expone la importancia de la microgeneración para satisfacer las necesidades de energía eléctrica en pequeñas comunidades, resumiendo su trabajo de la

siguiente manera. Las micro y mini hidroeléctricas en comunidades son una alternativa de acceso a energía y promoción de la economía familiar y comunitaria, como se ha demostrado en varios países. El andamiaje normativo vigente en Guatemala permite su promoción y las escalas de descentralización institucional del Estado facilitarían su organización y financiamiento, basadas en la gestión directa de las comunidades que se constituirían en cooperativas. La condición de éxito de los proyectos es su sostenibilidad financiera y ambiental.

La conflictividad social que produce la construcción de medianos y grandes proyectos hidroeléctricos en Guatemala, y la escasa inversión pública y privada en otros importantes proyectos generadores de energía eléctrica con tecnologías alternas, hace difícil la cobertura total del territorio nacional con energía eléctrica barata, mostrando la matriz energética actual alta dependencia de energía derivada del uso de combustibles fósiles, la cual no solo es más cara, sino también es contaminante del ambiente. Estar en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), tiene grandes ventajas para el usuario por el acceso a un servicio eficiente y garantizado a largo plazo, lo único que tiene que hacer es utilizarlo adecuadamente y pagar la factura mensual.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo General.

Definir y aplicar una metodología para el estudio de cuencas hidrológicas que cuenten con la suficiente información geográfica y estadística disponible, la cual será analizada a través de un Sistema de Información Geográfico, con la finalidad de determinar el potencial hídrico para la generación eléctrica.

1.4.2 Objetivos Particulares.

1) Establecer los aspectos técnicos de la investigación:

- Estudiar los métodos hidrológicos.
- Estudiar los métodos de análisis indirectos.
- Estudiar el manejo del software libre Qgis.

2) Diseñar el Sistema de Información Geográfico:

- Determinar el área de estudio.
- Obtener la información disponible.
- Construir la base de datos.

3) Construir el Sistema de Información Geográfico:

- Seleccionar los métodos de análisis estadístico hidrológico.

- Definir tratamiento de datos mediante métodos indirectos.
- Diseñar la metodología.

4) Evaluar el Sistema de Información Geográfico:

- Aplicar la metodología propuesta.
- Procesar de la información.
- Realizar correcciones necesarias.
- Comparar resultados.

Capítulo [II] Fundamentos Teóricos.

2.1 Introducción.

En este capítulo se describe los diferentes métodos, fórmulas matemáticas y empíricas; así como la representación gráfica del análisis de la información. En la actualidad, la cantidad de información que se genera día a día y para obtener resultados es necesario depurar, procesar y analizar, esta información tiene un carácter de importancia para encontrar un significado a lo que dicha información nos quiere decir.

Es fundamental tener claro los conceptos básicos, definiciones y metodologías existentes para determinar las características fisiográficas de una cuenca hidrológica, como área elevación, pendientes y escurrimientos que se generan en ella para el mejor aprovechamiento del recurso hídrico.

2.2 Precipitación y sus mediciones

LA precipitación es cualquier forma de humedad que llega a la superficie terrestre, ya sea lluvia, nieve, granizo, niebla, rocío, etc.

Se puede medir en términos de altura de agua pues consiste en la medida de un volumen por unidad de superficie; también mediante la medida de intensidad de precipitación y es la cantidad de agua que cae en una cierta área por unidad de tiempo. La precipitación varía en el espacio y en el tiempo de acuerdo con el patrón general de la circulación atmosférica y con los factores locales. Los aparatos más usuales en México para medir la precipitación son los pluviómetros y los pluviógrafos.

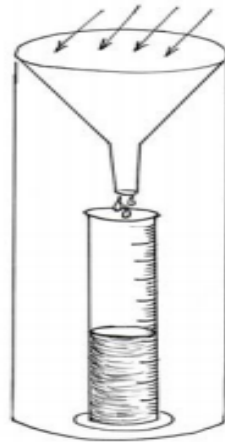


Figura II.1 Pluviómetro graduado.

Los pluviómetros están formados por un recipiente cilíndrico graduado de área transversal a al que descarga un embudo que capta el agua de lluvia, y cuya área de captación es A (figura 2.1). Se acostumbra colocar en el embudo un par de mallas para evitar la entrada de basura u otros objetos. El área de captación A es normalmente diez veces mayor que el área del recipiente a , con el objeto de que por cada milímetro de lluvia, se deposite un centímetro en el recipiente. De este modo es posible hacer lecturas a simple vista con una precisión de hasta una décima de milímetro de lluvia.

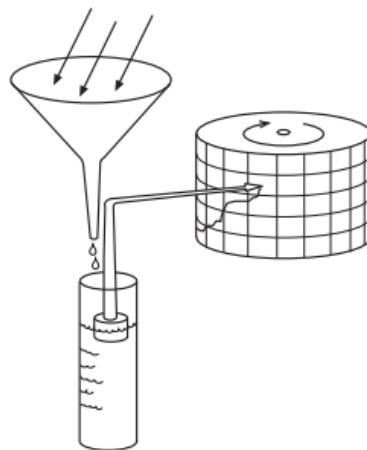


Figura II.2 Pluviógrafo.

Los pluviógrafos son similares a los pluviómetros, con la diferencia de que tienen un mecanismo para producir un registro continuo de precipitación. Este mecanismo está formado por un tambor que gira a velocidad constante sobre el cual se coloca un papel graduado especialmente. En el recipiente se coloca un flotador que se une mediante un juego de varillas a una plumilla que marca las alturas de precipitación en el papel (figura 2.2). El recipiente normalmente tiene una capacidad de 10 mm de lluvia y al alcanzarse esta capacidad, se vacía mediante un sifón. En este tipo de pluviógrafos, al girar el balancín se acciona un interruptor que produce un impulso eléctrico que a su vez mueve la plumilla para registrar la altura de precipitación correspondiente y de esa forma se genera un pluviograma.

Si a un registro como el de la (figura 2.3.a) se le quitan los descensos, se obtiene una gráfica de precipitación acumulada contra el tiempo llamada **curva masa de precipitación** (figura 2.3.b) A partir de esa curva masa de precipitación es posible obtener diagramas de barras que representen las variaciones de las alturas de precipitación o de su intensidad en intervalos de tiempo previamente seleccionados los cuales reciben el nombre de **hietogramas** (figura 2.4.)

El hietograma de la (figura 2.4.a) se construye dividiendo el tiempo que duró la tormenta en n intervalos (que pueden ser iguales o no) y midiendo la altura de precipitaciones que se tuvo de cada uno de ellos. El hietograma de la (figura 2.4.b) puede obtenerse a partir del de la (figura 2.4.a), dividiendo la altura de precipitación de cada barra entre el tiempo Δt que dura la misma. Ambos tipos de hietogramas son equivalentes, pero uno puede ser más útil que otro dependiendo del tipo de análisis.

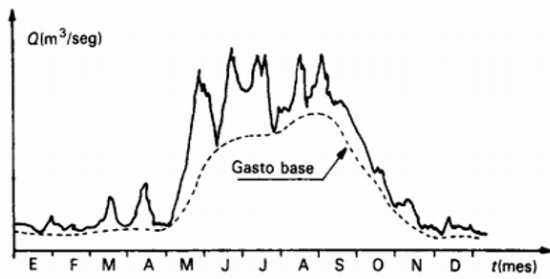


Figura II.4 Gráfica de precipitación acumulada.

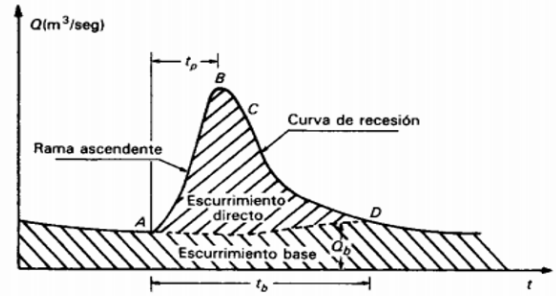


Figura II.3 Curva masa de precipitación.

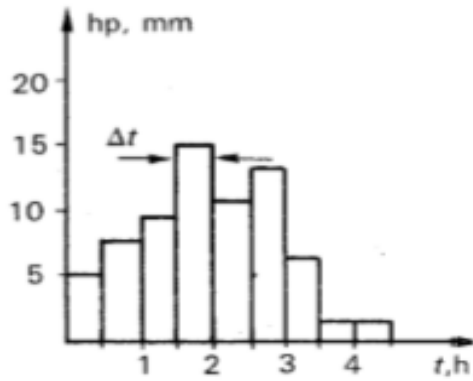


Figura II.6 Hietograma de alturas de precipitación.

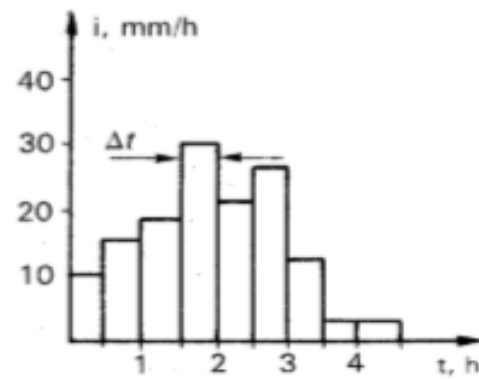


Figura II.5 Hietograma de intensidades.

2.3 Análisis de los datos de precipitación.

2.3.1 Lluvia media.

En general, la altura de la lluvia que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores aunque sea en sitios cercanos. Los aparatos descritos anteriormente registran la lluvia puntual, es decir, lo que se produce en el punto en que es instalado el aparato y para los cálculos de este análisis, es necesario conocer la lluvia media en un zona dada, como puede ser una cuenca.

Para calcular la lluvia media de una tormenta dada existen tres métodos de uso generalizado:

2.3.1.1 Método aritmético.

Consiste en obtener el promedio aritmético de las alturas de precipitación registradas en cada estación usada en el análisis:

$$hp = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n hpi \quad (\text{II-1})$$

Donde hp es la altura de precipitación media, hpi es la altura de precipitación registrada en la estación i y n es el número de estaciones bajo análisis.

2.3.1.2 Polígonos de Thiessen.

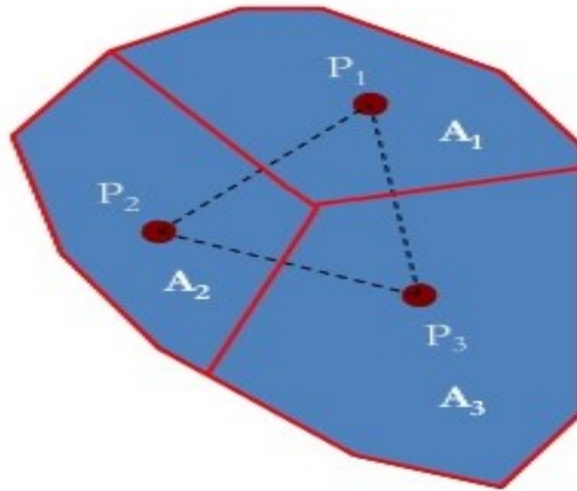


Figura II.7 Polígono de Thiessen.

Este método consiste en lo siguiente:

1. Unir, mediante líneas rectas dibujadas en un plano de la cuenca, las estaciones más próximas entre sí. Con ello se forman triángulos en cuyos vértices están las estaciones pluviométricas.
2. Trazar líneas rectas que bisectan los lados del triángulo. Por geometría elemental, las líneas correspondientes a cada triángulo convergerán en un solo punto, figura 2.5.
3. Cada estación pluviométrica quedará rodeada por las líneas rectas del paso 2, que forman los llamados polígonos de Thiessen y en algunos casos, en parte por el parteaguas será el área de influencia de la estación correspondiente.
4. La lluvia media se calcula entonces como un promedio pesado de las precipitaciones registrada en cada estación, usando como peso el área de influencia correspondiente:

$$hp = \frac{1}{At} \sum_{i=1}^n Ai hpi \quad (\text{II-2})$$

Donde A_i es el área de influencia de la estación, i y A_t es el área total de la cuenca.

2.3.1.3 Método de las isoyetas

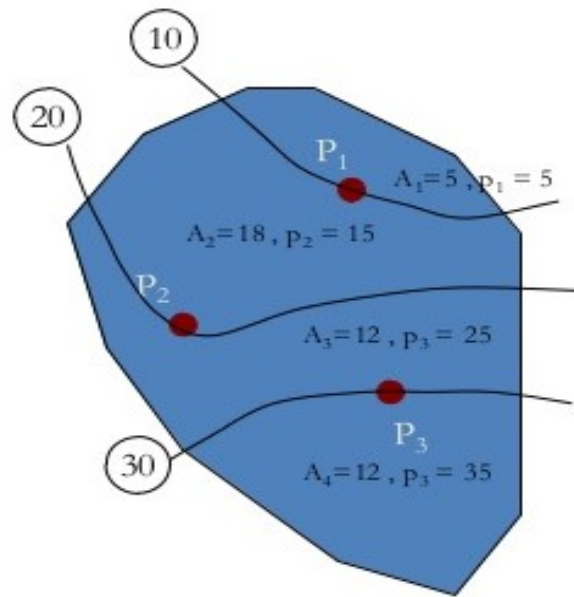


Figura II.8 Método de las isoyetas.

Este método consiste en trazar, con la información registrada en las estaciones, las líneas que unen puntos de igual altura de precipitación llamadas isoyetas, de modo semejante a como se trazan las curvas de nivel en topografía.

$$hp = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^{n'} A_i h_{pi} \quad (\text{II-3})$$

Donde n' es el número de áreas A_i consideradas.

El método aritmético es el más simple de todos, pero no toma en cuenta la distribución de las estaciones en la cuenca ni la manera en que se distribuye la lluvia en el espacio, pues se le asigna el mismo peso a todas las alturas de precipitación registradas; por ello, es útil en zonas con topografía muy suave y condiciones atmosféricas muy uniformes, o bien para tener sólo una idea aproximada de la altura de precipitación media.

Por el contrario el método de los polígonos de Thiessen sí toma en cuenta la distribución de las estaciones en el área de la cuenca, pero no los factores topográficos y de otro tipo que afectan a la distribución de la lluvia; este método es sin embargo, más conveniente que el de las isoyetas desde el punto de vista práctico, particularmente, para cálculos repetitivos, como cuando se analiza una gran cantidad de tormentas, pues los polígonos no cambian menos que se agreguen o eliminen estaciones.

El más preciso de todos los métodos es el de las isoyetas si éstas se dibujan de manera que tomen en cuenta los efectos topográficos en la distribución de la lluvia, para lo que es necesario tener cierta experiencia, por otra parte es método más laborioso de los tres, pues cada tormenta tiene un plano de isoyetas diferente.

2.3.2 Curva masa media.

Los métodos descritos anteriormente se han planteado para cuando se requiere conocer la altura total de precipitaciones que en promedio se producen en la cuenca durante una tormenta.

Cuando se desea conocer la variación en el tiempo de la precipitación media de la cuenca, es necesario determinar una curva masa media de precipitación.

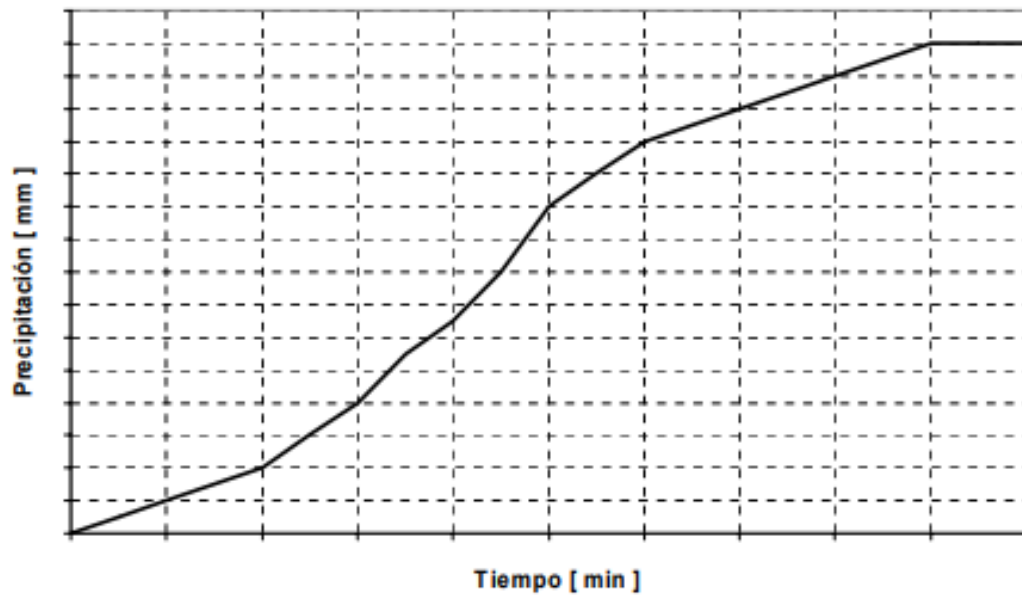


Figura II.9 Curva masa de precipitación.

Esta curva se construye aplicando el método aritmético o el de los polígonos de Thiessen a las alturas acumuladas de precipitación en cada estación a diferentes tiempos. El resultado será una curva masa media y se puede refinar calculando la precipitación media de toda la tormenta con el método de isoyetas y multiplicando cada ordenada de la curva masa media por el factor de ajuste:

$$Fa = \frac{h_p \text{ iso}}{h_p 0} \quad (\text{II-4})$$

Donde $h_p \text{ iso}$ es la altura de precipitación media de toda la tormenta calculada con el método de isoyetas y $h_p 0$ es la altura de precipitación media pero calculada con el método aritmético o el de polígonos de Thiessen. Este ajuste nos dará como resultado la curva masa media ajustada.

2.3.3 Curvas de intensidad duración periodo de retorno (i-d-T)

El grado óptimo de seguridad de una estructura depende por un lado de su costo y por otro del costo de las pérdidas asociadas a una falla.

La magnitud de este riesgo aceptable depende del balance entre el costo de la obra y el de los daños que se producirán al verificarse una falla y para poder determinar cuál es el riesgo que se corre al proponer los parámetros de diseño de la obra, es necesario analizar estadísticamente los datos hidrológicos recabados en la zona de estudio.

Estos datos son fundamentalmente de dos tipos: escurrimientos y precipitaciones. Un análisis del primer tipo de datos tendría como resultado un parámetro de diseño el cual es el gasto máximo, mientras que el segundo proporcionaría datos con los cuales sería necesario alimentar un modelo de la relación lluvia-escurrimiento para obtener una avenida de diseño o gasto de diseño y el cual es el objetivo principal del presente estudio.

2.3.3.1 Algunos conceptos de probabilidad y estadística.

Probabilidad. Si un experimento tiene n resultados posibles y mutuamente excluyentes y si de ellos n_a resultados tiene un atributo a , entonces la probabilidad de que ocurra un evento A con el atributo a es:

$$P(A) = \frac{n_a}{n} \quad (\text{II-5})$$

Periodo de retorno. Si el experimento probabilístico lo denominamos “ocurrencia de una tormenta” la probabilidad de que ocurra un evento con atributo a que describiremos como la probabilidad que ocurra una precipitación en 24 h con una altura máxima de 500 mm, la probabilidad de que el resultado de este experimento tenga un valor exacto como el de 500 mm, sería prácticamente nula, ya que difícilmente se llegará a ese valor durante cierto número de eventos en este caso es necesario más bien hablar de intervalos, como por ejemplo que la precipitación mencionada tome un valor menor de 500 mm o mayor de 500 mm o que este en un intervalo de 300 a 500 mm

El número de años en que en promedio se presenta un evento como el anterior descrito se llama periodo de retorno, intervalo de recurrencia o simplemente frecuencia y se acostumbra denotarlo con T .

2.4 Relaciones lluvia - escurrimiento.

Es sumamente común que no se cuente con los registros adecuados de escurrimiento en el sitio de interés para determinar los parámetros necesarios para el diseño y operación de obras hidráulicas. En general, los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento y además no se afectan por cambios en la cuenca, como construcción de obras de almacenamiento y derivación, talas, urbanización, etc. Por ello es conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en una cuenca mediante las características de la misma cuenca y la precipitación. Las características de la cuenca se conocen por medio de planos topográficos y de uso de suelo y la precipitación a través de mediciones directas obtenidas de las estaciones climáticas.

Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son los siguientes:

- Área de la cuenca.
- Altura total de precipitación.

- Características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.)
- Distribución de la lluvia en el tiempo.
- Distribución de la lluvia en el espacio dependiente de las características de la cuenca.

Debido a que por un lado la cantidad y calidad de la información disponible varían grandemente de un problema a otro y a que por otro, no siempre se requiere la misma precisión en los resultados se han desarrollado una gran cantidad de métodos para analizar la relación lluvia escurrimiento.

Desde luego, la complejidad de los métodos aumenta a medida que se toman en cuenta más de los parámetros citados anteriormente. En este sentido aumenta también su precisión, pero los datos que se requieren son de más y mejor calidad. Sólo se explicarán los métodos que tomen en cuenta los cuatro primeros parámetros.

2.4.1 Método de envolventes.

Estos métodos toman en cuenta sólo el área de la cuenca. Aunque no son métodos que analicen propiamente la relación entre lluvia y el escurrimiento, se explicarán por ser de enorme utilidad en los casos en que se requieran solo estimaciones gruesas de los gastos máximos probables o bien cuando se carezca casi por completo de información.

La idea fundamental de estos métodos es relacionar el gasto máximo Q con el área de la cuenca A_c en la forma:

$$Q = \alpha A_c^\beta \quad (\text{II-6})$$

Donde Q es el gasto máximo y α y β son parámetros empíricos, que también pueden ser función de A_c .

2.4.2 La fórmula racional.

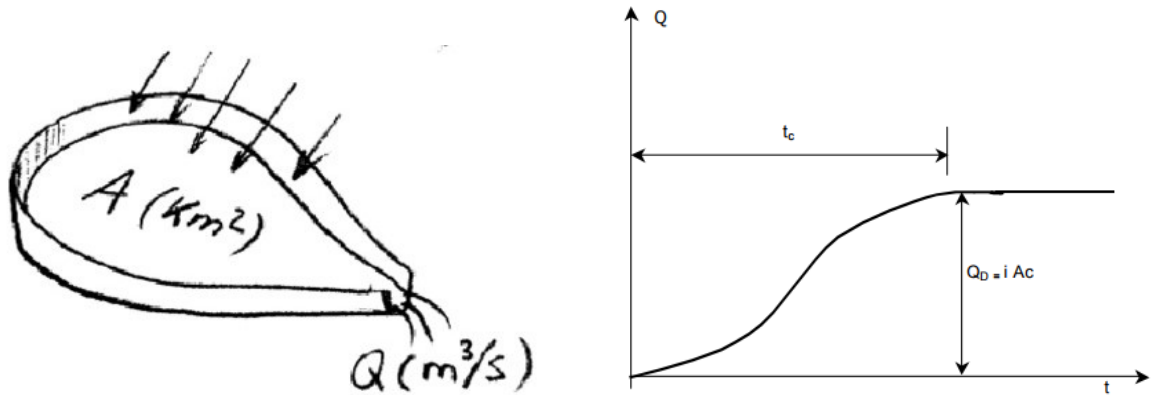


Figura II.10 Hipótesis fundamental de la fórmula racional.

La fórmula racional es posiblemente el modelo más antiguo de la relación lluvia-escorrentamiento. Su origen se remonta a 1851 o 1889 de acuerdo con diversos autores. Este modelo toma en cuenta además del área de la cuenca, la altura o intensidad de precipitación y hoy en día es muy utilizado, particularmente en el diseño de drenajes urbanos.

Supóngase que en una cuenca impermeable se hace caer uniformemente una lluvia de intensidad constante durante un largo tiempo. A l principio el gasto que sale de la cuenca será creciente con el tiempo, pero llegará un momento en el que se alcance un punto de equilibrio, es decir, en el que el volumen que entra por unidad de tiempo por la lluvia sea el mismo que el gasto de salida de la cuenca.

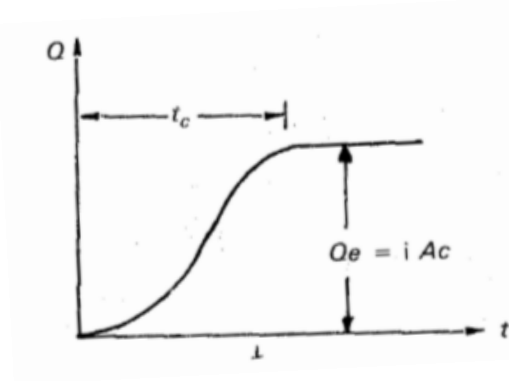


Figura II.11 Tiempo de concentración.

El tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio se denomina tiempo de concentración y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca.

Naturalmente, el tiempo de concentración t_c (Figura 2.4.2) depende de la longitud máxima que debe recorrer el agua hasta la salida de la cuenca y de la velocidad que adquiere, en promedio dentro de la misma. Esta velocidad está en función de las pendientes del terreno, los cauces y de la rugosidad de la superficie de los mismos, el tiempo de concentración se calcula mediante la ecuación:

$$t_c = \frac{L}{3600v} \quad (\text{II-7})$$

Otra manera de estimar el tiempo de concentración es mediante la fórmula de Kirpich

$$tc = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (\text{II-8})$$

Donde S es la pendiente del cauce principal, L se expresa en metros y tc resulta en altura. S se determina con alguno de los métodos estudiados con anterioridad.

Tabla II.1 Tiempo de concentración.

Pendiente del cauce principal, %	Velocidad media, m/s	Velocidad media, m/s			
		Pendiente %	Bosques	Pastizales	Canal natural no bien definido
1-2	0.6	0-3	0.3	0.5	0.3
2-4	0.9	4-7	0.6	0.9	0.9
4-6	1.2	8-11	0.9	1.2	1.5
6-8	1.5	12-15	1.1	1.4	2.4

a) b)

En una cuenca no impermeable, sólo una parte de la lluvia con intensidad i escurre directamente hasta la salida. Si se acepta que durante la lluvia o al menos una vez que se ha establecido el gasto de equilibrio, no cambia la capacidad de infiltración en la cuenca, se puede escribir la llamada fórmula racional:

$$Q_p = C_i A_c \tag{II-9}$$

Donde C es un coeficiente de escurrimiento, que representa la fracción de la lluvia que se escurre en forma directa y Q_p es el gasto máximo posible que puede producirse con una lluvia de intensidad i en una cuenca de área A_c y coeficiente de escurrimiento C . Como se mencionó en los temas anteriores, el coeficiente de escurrimiento toma valores entre 0 y 1 y varía apreciablemente de una cuenca a 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. Algunos de estos valores se muestran en la tabla 8.3, los cuales generalmente son conservadores para que puedan ser usados para diseño.

2.4.3 Hidrograma unitario.

Supóngase que se presenta una misma tormenta en dos cuencas con el mismo suelo y la misma área, pero de diferente forma (véase figura) aunque el volumen escurrido sea el mismo, el gasto de pico y las demás características del hidrograma varían desde una cuenca a otra. El método del Hidrograma unitario toma en cuenta este efecto considerando además de la altura de precipitación y el área de la cuenca su forma pendiente, vegetación, etc. aunque no de forma explícita.

Hidrograma unitario. Se define como el hidrograma de escurrimiento directo que se produce por lluvia efectiva o en exceso de lámina unitaria, duración d y repartida uniforme de la cuenca.

El método del hidrograma unitario fue desarrollado originalmente por Sherman en 1932 y está basado en la siguiente hipótesis:

- a) Tiempo de base constante: Para una cuenca dada, la duración total de escurrimiento directo o tiempo base es la misma para todas las tormentas con la misma duración de lluvia efectiva, independientemente del volumen total escurrido. Todo hidrograma unitario está ligado a una duración de lluvia en exceso.
- b) Linealidad o proporcionalidad: Las ordenadas de todos los hidrogramas de escurrimiento directo con el mismo tiempo base son directamente proporcionales al volumen total de escurrimiento directo, es decir, al volumen total de lluvia efectiva. Como consecuencia las ordenadas de dichos hidrogramas son proporcionales entre sí.
- c) Superposición de causas y efectos: El hidrograma que resulta de un periodo de lluvia dado puede superponerse a hidrogramas resultantes de periodos lluviosos precedentes.

El concepto de hidrograma unitario se ha usado de manera muy extensa en prácticamente todo el mundo desde su publicación original.

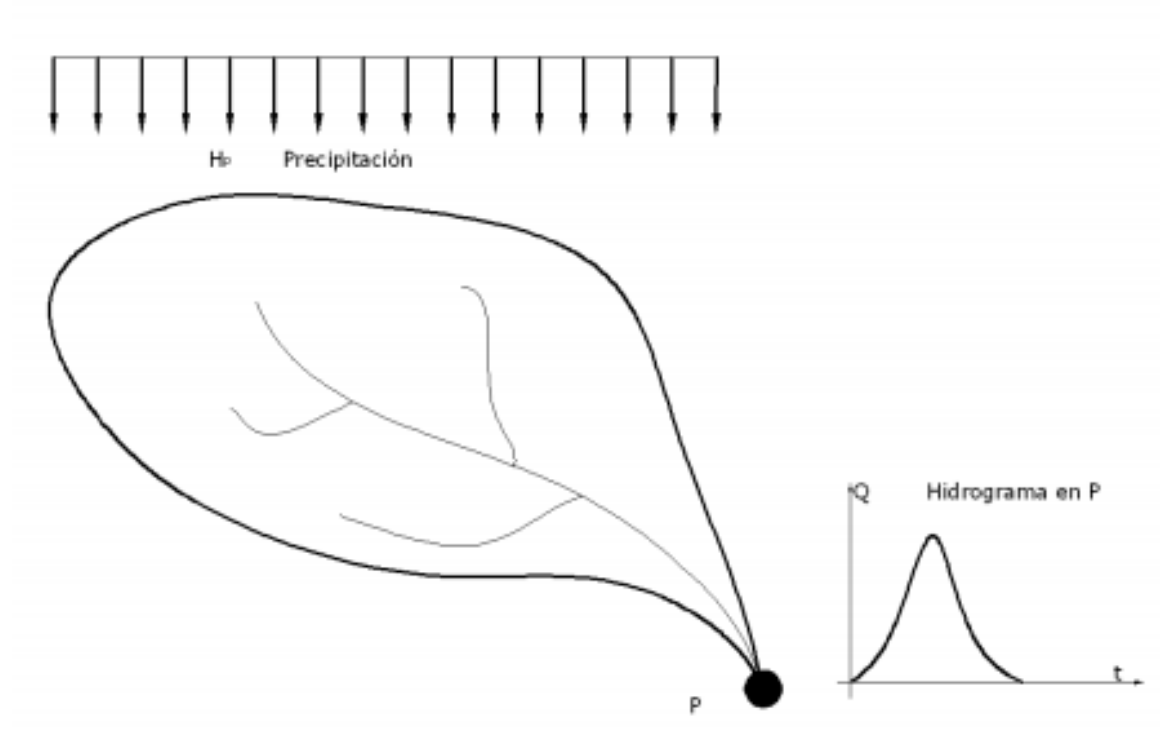


Figura II.12 Representación de la precipitación a la salida de la cuenca.

2.5 Probabilidad y estadística en hidrología.

Los procesos hidrológicos evolucionen en el espacio y en el tiempo en una forma que es parcialmente predecible, o determinística y parcialmente aleatoria. Un proceso de este tipo se conoce con el nombre de procesos estocástico. En algunos casos, la variabilidad determinística, que se justifica que el hidrólogo trate el proceso como puramente aleatorio. De esta manera, el valor de una observación del proceso no está correlacionada con los valores de observaciones adyacentes y las propiedades estadísticas de todas las observaciones son iguales.

Cuando no existe correlación entre observaciones adyacentes, la salida de un sistema hidrológico es tratada como estocástica, independiente del espacio e independiente del tiempo.

El diseño y la planeación de obras hidráulicas están siempre relacionadas con eventos hidrológicos futuros; por ejemplo, la avenida de diseño para el vertedor de una presa es un evento que tal vez no se han presentado jamás, o al menos no en el periodo de datos disponible, pero que es necesario conocer para determinar las dimensiones de la obra. La complejidad de los procesos físicos que tienen lugar en la generación de la avenida hace, en la mayoría de los casos, imposible una estimación confiable de la misma por métodos son insuficientes, sea porque el modelo matemático sería exageradamente grande, complicado y difícil de manejar.

Por ello, y como sucede en la mayoría de las ciencias, con mucha frecuencia el estadístico es el camino obligado en la solución de los problemas. En particular, la probabilidad y la estadística juegan un papel de primer orden en el análisis hidrológico.

2.5.1 Distribuciones de probabilidad para las variables hidrológicas.

Una vez que se asigna un periodo de retorno al gasto de diseño de la obra en cuestión, generalmente es necesario, para conocer dicho gasto de diseño, hacer extrapolaciones a partir de los gastos máximos anuales registrados, pues rara vez este periodo es menor al periodo de datos.

Por ejemplo, puede ser necesario determinar un gasto de diseño con periodo de retorno 1000 años a partir de 25 años de registro. Si los gastos máximos anuales registrados se dibujan contra sus respectivos periodos de retorno, generalmente se observa alguna tendencia más o menos definida. El problema radica en cómo extender esta tendencia hasta el periodo de retorno deseado. Una posibilidad es extrapolar los datos a ojo, es decir, gráficamente. Aunque este método puede dar muy buenos resultados si se aplica por una persona con experiencia, tiene la desventaja de la subjetividad; esto es, si veinte ingenieros diferentes lo aplican, es probable que el resultado sean veinte gráficas diferentes.

Para eliminar esta subjetividad, se debe buscar entre las distintas funciones de distribución de probabilidad teóricas la que se ajuste mejor a los datos medidos y usar esta segunda función para la extrapolación.

En la estadística existen decenas de funciones de distribución de probabilidad teóricas; de hecho, existen tantas como se quiera, y obviamente no es posible probarlas todas para un problema particular. Por lo tanto es necesario escoger, de esas funciones, las que se adapten mejor al problema bajo análisis

En esta sección se presenta una selección de las distribuciones de probabilidad comúnmente utilizadas para variables hidrológicas

2.5.2 Distribución normal.

La distribución normal surge del teorema del límite central, el cual establece que si una secuencia de variables aleatorias X_i son independientes y están idénticamente distribuidas con media μ y varianza σ^2 , entonces la distribución de la suma de n de estas variables aleatorias. $Y = \sum_{i=1}^n X_i$, tiende hacia la distribución normal con media $n\mu$ y varianza $n\sigma^2$ a medida que n aumenta. El punto importante es que esto es cierto sin importar cuál es la función de distribución de probabilidad de X . Las variables hidrológicas, como la precipitación anual, calculadas como la suma de los efectos de muchos eventos independientes tienden a seguir la distribución normal. Las principales limitaciones de la distribución normal en la descripción de variables hidrológicas son, por un lado, que esta varía a lo largo de un rango continuo $[-\infty, +\infty]$, mientras que la mayor parte de las variables hidrológicas son no negativas y por otro lado, que es simétrica alrededor de la media, mientras que la información hidrológica tiende a ser asimétrica.

2.5.3 Distribución log-normal.

Si la variable aleatoria $Y = \log X$ esta normalmente distribuida, entonces se dice que X está distribuida en forma log-normal. Chow (1954) llegó a la conclusión de que esta distribución se aplican a variables hidrológicas formadas como productos de otras variables debido a que si $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$, entonces $Y = \log X = \sum_{i=1}^n \log X_i = \sum_{i=1}^n Y_i$

Lo cual tiende a la distribución normal para valores grandes de n siempre y cuando X_i sea independientes y estén idénticamente distribuidos. Se ha encontrado que la distribución log-normal describe la distribución de la conductividad hidráulica en un medio poroso. La distribución de tamaño de gotas de lluvia en una tormenta y otras variables hidrológicas. La distribución log-normal tiene las ventajas sobre la distribución normal de que está limitada ($X > 0$) y de que la transformación log tiende a reducir la asimetría positiva comúnmente encontrada en información hidrológica, debido

a que al tomar logaritmos se reducen en una proporción mayor los números grandes que los números pequeños. Algunas limitaciones de la distribución log-normal son por un lado que tienen solamente dos parámetros y por otro lado que requiere que los logaritmos de los datos sean simétricos alrededor de su media.

2.5.4 Distribución exponencial.

Algunas secuencias de eventos hidrológicos, como la ocurrencia de precipitación pueden considerarse como *procesos de Poisson*, en los cuales los eventos o tiempo de interarribo ocurren instantáneamente e independientemente en un horizonte de tiempo, o a lo largo de una línea. El tiempo entre tales eventos, está descrito por una distribución exponencial cuyo parámetro λ es la tasa media de ocurrencia de los eventos. La distribución exponencial se utiliza para describir los tiempos de interarribo de choques aleatorios a sistemas hidrológicos, tales como volúmenes de escorrentía contaminada que entran en los ríos a medida de que la lluvia lava los contaminantes localizados en la superficie del terreno. La ventaja de la distribución exponencial radica en que es fácil estimar λ a partir de la información observada y que la distribución exponencial se adapta muy bien a los estudios teóricos, tales como un modelo de probabilidad para el embalse lineal ($\lambda = 1/k$), donde k es la constante de almacenamiento en el embalse lineal). Su desventaja es que requiere que la ocurrencia de cada evento sea completamente independiente de sus vecinos, lo cual puede ser un supuesto no válido para el proceso de lluvia y esto ha llevado a los investigadores a estudiar varias formas de *procesos de Poisson compuestos*, en los cuales λ se considera como una variable aleatoria en lugar de una constante [11] [12].

2.5.5 Distribución gamma.

El tiempo que toma la ocurrencia de un número β de eventos en un proceso de Poisson está descrito por la distribución gamma, la cual es la distribución de una suma de β variables aleatorias independientes e idénticas, distribuidas exponencialmente. La distribución gamma tiene una forma

que varía suavemente similar a la función de densidad de probabilidad típica, y es muy útil para la descripción de variables hidrológicas asimétricas sin uso de la transformación log. Se ha aplicado a la descripción de la distribución de profundidades de precipitación en tormentas, por ejemplo. La distribución gamma incluye la función *gamma* $\Gamma(\beta) = (\beta-1)! = (\beta-1)(\beta-2)\dots$ para un entero positivo β y en general por:

$$\Gamma(\beta) = \int_0^{\infty} u^{\beta-1} e^{-u} du \quad (\text{II-10})$$

La distribución gamma de dos parámetros (parámetros β y λ) tiene como límite inferior cero, lo cual es una desventaja para la aplicación a variables hidrológicas que tienen un límite inferior superior a cero [13].

2.5.6 Distribución Pearson tipo III.

La distribución Pearson tipo III, también llamada *Distribución gamma de tres parámetros*, introduce un tercer parámetro, el límite inferior ϵ , de tal manera que por el método de los momentos, los tres momentos de la muestra (la media, la desviación estándar y el coeficiente de asimetría) pueden transformarse en los tres parámetros λ , β y ϵ de la distribución de probabilidad. Esta es una distribución muy flexible, que puede asumir diferentes formas a medida que λ , β y ϵ varían [14]

El sistema de distribuciones de Pearson incluye siete tipos; todas son soluciones para $f(x)$ en una ecuación de la forma

$$\frac{d[f(x)]}{dx} = \frac{f(x)(x-d)}{C_0 + C_1x + C_2x^2} \quad (\text{II-11})$$

Donde d es la moda de la distribución (el valor de x para el cual $f(x)$ es un máximo) y C_0 , C_1 y C_2 son coeficientes que deben determinarse. Cuando $C_2 = 0$, la solución de esta ecuación es una distribución de Pearson tipo III, con una función de densidad de probabilidad. Por lo tanto la distribución normal es un caso especial de la distribución de Pearson tipo III para describir una variable no asimétrica. La distribución de Pearson tipo III se aplicó por primera vez en la hidrología por Foster (1924) para describir la distribución de probabilidad de picos de crecientes máximos anuales. Cuando la información es muy asimétrica positivamente se utiliza una transformación log para reducir la asimetría.

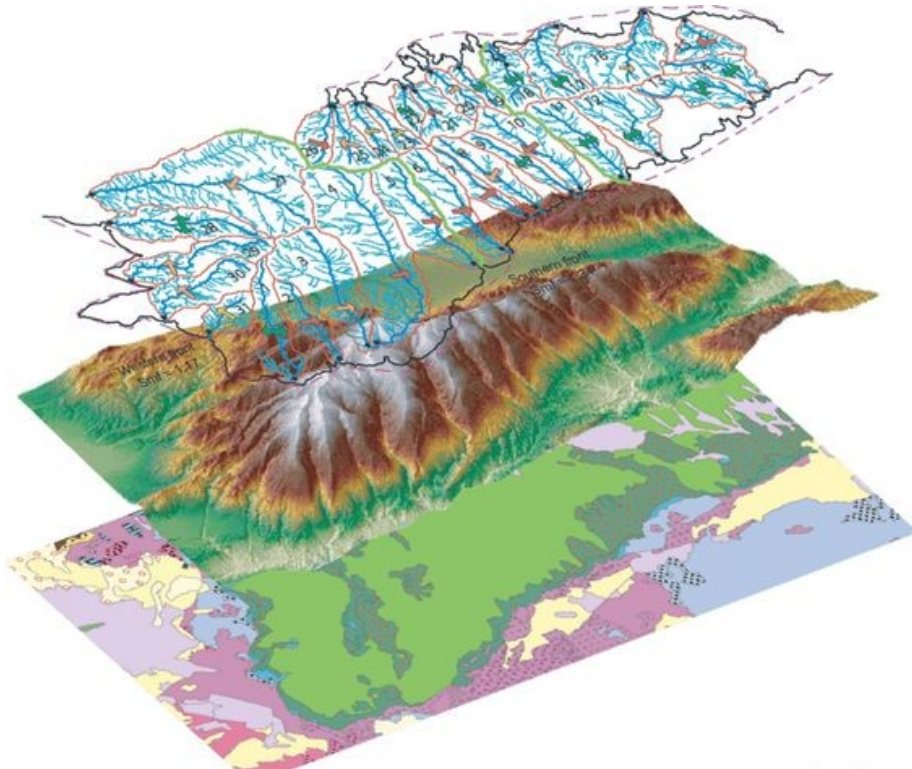
2.6 Generalidades de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Los Sistemas de Información Geográficas (SIG o GIS, por las siglas en inglés Geographical Information Systems). Estas aplicaciones permiten integrar y analizar gran cantidad de información espacial que anteriormente era difícil ya que se tenía que hacer regularmente de manera manual.

La tecnología SIG ha sido aplicada en diversos campos de conocimiento y obteniendo múltiples resultados, por lo que se ha considerado una herramienta importante para la integración y el análisis de grandes cantidades de información geográfica. Su utilización ha sido fundamental para llevar a cabo los estudios en el campo de la evaluación de los recursos naturales, medio ambiente y geomorfología [15].

El surgimiento del que se considera el primer SIG² tuvo su origen en Canadá con el nombre de Canadian Geographic Information System (CGIS) en 1964, bajo la dirección del Dr. Roger Tomlinson, a quien se le considera hoy el padre de la tecnología SIG [16]. Sistema realizado para el Ministerio de Agricultura de Canadá con la finalidad de servir de apoyo en la realización del inventario forestal del país.

A modo de tener una perspectiva un tanto general sobre lo que es un SIG, lo definimos como un conjunto de herramientas diseñadas para obtener, recuperar y desplegar datos espaciales del mundo real. Estos datos pueden ser: conjuntos de mapas, de la misma porción del territorio, donde un lugar tiene la misma localización (las mismas coordenadas) en todos los mapas, de esa forma resulta posible realizar el análisis de sus características espaciales y temáticas, para obtener un mejor conocimiento de esa zona[17].



2 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Figura II.13 Representación de un sistema de información geográfico SIG

El objetivo principal de un SIG es el almacenamiento, manejo y manipulación de grandes volúmenes de datos espacialmente referenciados, para proveer los medios para llevar a cabo el análisis de interés, la organización y administración de los datos, se debe realizar de tal forma que esta sea fácilmente accesible a los usuarios y de esa forma la pueda vincular a diversas bases de datos.

Tabla II.2 Componentes y características que debe componer un SIG

COMPONENTES	CARACTERISTICAS
<ul style="list-style-type: none"> • PERSONAL.No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacitado en los temas de aplicación y en el manejo de las herramientas de SIG. - Estructura
<ul style="list-style-type: none"> • ORGANIZACIÓN. 	<ul style="list-style-type: none"> - Estructura funcional y organización del personal para la ejecución de actividades. - Ubicada
<ul style="list-style-type: none"> • INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ubicada espacialmente, actualizada, completa y útil para las aplicaciones.
<ul style="list-style-type: none"> • NORMAS, PROCEDIMIENTOS Y METODOLOGÍAS. 	<ul style="list-style-type: none"> - Con suficiente detalle y probadas
<ul style="list-style-type: none"> • PROGRAMAS DE COMPUTO 	<ul style="list-style-type: none"> - De acuerdo a los tres puntos anteriores. Además
<ul style="list-style-type: none"> • EQUIPO 	<ul style="list-style-type: none"> - Además de lo anterior, según el volumen de datos.

La importancia de un SIG radica en varios puntos, pero los principales son:

- Integran información espacial y de otros tipos
- Ofrecen un marco consistente de análisis para los datos geográficamente referenciados.
- Ofrecen nuevas y novedosas formas para manipular y desplegar datos.
- Permiten la visualización y el análisis de datos con base en las relaciones y proximidad geográficas.

Con base en la ubicación geográfica y la disponibilidad de datos, mediante un SIG se pueden establecer conexiones entre diversos fenómenos, observando los datos geográficamente se

pueden sugerir nuevas explicaciones a dichos fenómenos, las interrelaciones, frecuentemente, son difíciles de reconocer sin los SIG, pero son vitales para el entendimiento y manejo de actividades y recursos.

Un SIG tiene la capacidad de responder a distintas preguntas:

Tabla II.3 Preguntas que debe responder un SIG.

SITUACIÓN	PREGUNTA
• LOCALIZACIÓN	- ¿Qué hay en...?
• CONDICIÓN	- ¿Dónde se produce tal circunstancia...?
• HISTORIA	- ¿Qué cambios se han producido desde...?
• MODELOS	- ¿Qué modelo de distribución existe...?
• SIMULACIÓN	- ¿Qué pasaría si...?

2.6.1 Ventajas y desventajas de un SIG.

Tabla II.4 Ventajas y desventajas de un SIG

VENTAJAS DE UN SIG	DESVENTAJAS DE UN SIG
• Capacidad del almacenamiento. Múltiples niveles de datos.	- Alto costos de adquisición y mantenimiento del sistema.
• Los datos se almacenan y se presentan en forma separada. La presentación es múltiple.	- Costos y problemas técnicos en la captura de datos (conversión analógica-digital) y en la transferencia (incompatibilidades)
• Capacidad de manejo. Edición y actualización.	- Costos de mantenimiento de datos. Administración, actualización y edición.

-
- **Rapidez en la operación.** - Necesidad de formación de cuadros especializados. Operación en el ámbito digital.
-
- **Capacidad de establecer una relación coherente. Utilizar simultáneamente datos espaciales y sus atributos.** - Falsa sensación de exactitud.
-
- **Capacidad de análisis. Implementación de modelos de aplicación.**
-

2.7 Sobre el programa de computo Quantum Gis (QGIS).

La elección del software para la interpretación y manipulación de nuestras bases de datos fue realizada a través de dos criterios primordiales.

- a) El costo.
- b) La interfaz de hacia los usuarios (un software de fácil uso)

En relación al primer criterio de selección se investigó el principal manejador de SIG en el mercado. Desarrollado por ESRI (ENVIROMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE) comercializa para manejo de Sistemas de información Geográfica **ArcGIS** es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los **SIG**. Producido y comercializado por ESRI, bajo el nombre genérico **ArcGIS** se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. Estas aplicaciones se engloban en familias temáticas como **ArcGIS Server**, para la publicación y gestión web, o **ArcGIS Móvil** para la captura y gestión de información en campo.

ArcGIS Desktop, la familia de aplicaciones **SIG** de escritorio, es una de las más ampliamente utilizadas, incluyendo en sus últimas ediciones las herramientas **ArcReader**, **ArcMap** y **ArcGlobe**, además de diversas extensiones. **ArcGIS for Desktop** se distribuye comercialmente bajo tres niveles de licencias que son, en orden creciente de funcionalidades y costo: **ArcView**, **ArcEditor** y **ArcInfo**[18].

El distribuidor oficial en México de los productos de **ESRI** es la empresa SIGSA, la cual maneja un precio en dólares americanos de \$1,400.00 USD, por una licencia completa de su producto más funcional **ArcView** eso tiene los beneficios de tener acceso a mapas, bases de datos, tablas, consultorías y otras opciones más.

Por otra parte **QGIS** (anteriormente llamado también **Quantum GIS**) es un Sistema de Información Geográfica (**SIG**) de código libre para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows y Android.² Era uno de los primeros ocho proyectos de la Fundación OSGeo y en 2008 oficialmente graduó de la fase de incubación. Permite manejar formatos raster y vectoriales a través de las bibliotecas GDAL y OGR, así como bases de datos. Algunas de sus características son:

- Soporte para la extensión espacial de PostgreSQL, PostGIS.
- Manejo de archivos vectoriales Shapefile, ArcInfo converges, Mapinfo, GRASS GIS, etc.
- Soporte para un importante número de tipos de archivos raster (GRASS GIS, GeoTIFF, TIFF, JPG, etc.)

Una de sus mayores ventajas es la posibilidad de usar **Quantum GIS** como **GUI** (Graphic User Interface) del SIG GRASS, utilizando toda la potencia de análisis de este último en un entorno de trabajo más amigable. QGIS está desarrollado en C++, usando la biblioteca Qt para su Interfaz gráfica de usuario. Quantum GIS permite la integración de complementos (plugins) desarrollados tanto en C++ como Python.

Una de las grandes fortalezas de QGIS es que trabaja en cualquiera de los sistemas operativos: GNU/Linux, BSD, Unix, Mac OSX, Windows y Android, funcionando de manera similar en todos ellos.

QGIS es un Sistema de Información Geográfica de código abierto. El proyecto nació en mayo de 2002 y se estableció como un proyecto en SourceForge en junio del mismo año. El objetivo de los creadores es hacer que el software SIG (tradicionalmente software propietario caro) esté al alcance de cualquiera con acceso básico a un ordenador personal. QGIS actualmente funciona en la

mayoría de plataformas Unix, Windows y OS X. QGIS se desarrolla usando el kit de herramientas Qt (<http://qt.digia.com>) y C++. Esto significa que es ligero y tiene una interfaz gráfica de usuario (GUI) agradable y fácil de usar.

QGIS es un SIG amigable, proporcionando funciones y características comunes. El objetivo inicial del proyecto era proporcionar un visor de datos SIG. QGIS ha alcanzado un punto en su evolución en el que está siendo usado por muchos para sus necesidades diarias de visualización de datos SIG. QGIS admite diversos formatos de datos raster y vectoriales, con el nuevo formato de ayuda fácilmente agregado usando la arquitectura del complemento.

QGIS se distribuye bajo la Licencia Pública General GNU (GPL). El desarrollo de QGIS bajo esta licencia significa que se puede revisar y modificar el código fuente y garantiza que usted, nuestro feliz usuario, siempre tendrá acceso a un programa de SIG que es libre de costo y puede ser libremente modificado. Debería haber recibido una copia completa de la licencia con su copia de QGIS, y también podrá encontrarla en el Apéndice GNU General Public License[19].

Por lo tanto para el desarrollo del proyecto que esta tesis defiende, la elección del software quedo definida, siendo **QGIS** el manejador, por todo lo anteriormente dicho.

2.7.1 Complementos computacionales para hidrología.

HIDRO_SIG es una herramienta para la estimación de balances hidrológicos de Colombia, un sistema de información geográfico para la estimación, despliegue, análisis y consulta interactiva de las variables más importantes del ciclo hidrológico en Colombia, tales como precipitación, evaporación potencial y real y escorrentía, tanto a nivel anual como mensual.

Es un SIG flexible y versátil para la estimación hidrológica en cuencas con y sin medición, ya que permite estimar los caudales promedio de largo plazo en cualquier punto de la hidrología

Colombiana, usando la metodología de balance hídrico de largo plazo[20]. (La ventaja es el acceso total al código fuente).

AX es una herramienta computacional que analiza y calcula las tendencias estadísticas sobre los comportamientos en los incrementos de los gastos generados por las lluvias, analiza históricos de precipitaciones para desarrollar modelos predictivos, con el objetivo de determinar incrementos eventuales de gastos.

Diseñado para el Centro Nacional de Prevención de Desastres que pertenece al Sistema Nacional de Protección Civil, en 1997, AX es una herramienta un tanto antigua pero muy funcional al momento de realizar la estadística de dichos eventos.

El programa AX.EXE ajusta distintas funciones de probabilidad a series de datos, calcula el error estándar de cada una de ellas y estima valores para diferentes períodos de retorno. Las funciones de probabilidad que contempla el programa son las siguientes: Normal, Log-normal, Gumbel, Exponencial, Gamma y doble Gumbel. Los métodos para calcular los parámetros de las funciones de probabilidad son: por momentos y por máxima verosimilitud; además, las funciones Log-normal y Gamma pueden calcularse para dos o tres parámetros. El método utilizado en la función Doble Gumbel es de mínimos cuadrados y puede resolverse de manera “visual” o numérica [21].

2.8 Desarrollo de herramientas y casos de estudio para el manejo de SIG en Latinoamérica y México.

En los últimos años, el incremento en el uso de SIG para analizar diferentes problemáticas, con diferentes objetivos es de hacerse notar, ya que como se mencionó en párrafos anteriores, la “espacialización” de los datos generados por las personas en el común andar de sus vidas y el entorno

nos brindan información, que puede ser analizada para tratar de entender del porque suceden las cosas, esta información crea tendencia a modo que nos permiten modelar ciertos comportamientos, para predecir, evaluar y tomar decisiones sobre algún tipo en particular de problemática, que pueden ir desde el comportamiento de consumo de una población, el estudio de transmisión de virus, la migración de insectos, etc.

El caso en particular que nos ocupa en esta tesis se refiere al manejo de la información enfocada a cuencas y su comportamiento en presencia de las precipitaciones pluviales. En muchas partes del mundo se han desarrollado trabajos que no son similares pero si, que contienen particularidades que se asemejan a el estudio que se defiende en este trabajo, de igual forma en Latinoamérica y México se han realizado trabajos de igual índole, así que a continuación se realizará un resumen de algunos de ellos enfocándonos de mayor manera a los casos latinoamericanos y mexicanos, por tener características muy similares al entorno chiapaneco que es donde se llevará acabo nuestro estudio.

2.8.1 HIDROSIG: un sistema de información geográfica para la gestión de recursos naturales y modelación del medio ambiente [22].

Desarrollado por el posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín se presenta esta herramienta como una plataforma para la visualización y el análisis de variables hidro-climatológicas, mediante un conjunto de módulos que la convierten en una poderosa herramienta para la modelación hidrológica.

El uso cada vez más generalizado de los sistemas de información geográfica ha obligado a disciplinas como la geomorfología, la hidrología, la geotecnia y otras, a incorporar nuevas

metodologías de modelación. El Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín ha desarrollado un Sistema de Información Geográfica con énfasis en la gestión de los recursos naturales y la modelación de fenómenos ambientales, el cual se ha denominado **HidroSIG** [23]. A pesar de haber sido concebido inicialmente como un conjunto de herramientas para la cuantificación del recurso hídrico dentro del territorio colombiano, **HidroSIG** se ha convertido en una librería computacional que combina funciones propias de los sistemas de información geográfica con herramientas que permiten al usuario la visualización y modelación de variables y fenómenos hidrológicos, hidro-climatológicos, geomorfológicos, hidráulicos y ambientales.

En general, puede decirse que **HidroSIG** se concibe como un conjunto de herramientas computacionales escritas en lenguaje de programación Java, las cuales se han clasificado dentro de tres categorías, básicas, especializadas y avanzadas, de acuerdo con la utilidad que puedan prestarle al usuario.

2.8.2 Desarrollo de herramientas ArcGIS para el cálculo de indicadores físicos y socio-económicos en cuencas hidrográficas [24].

Un trabajo realizado para la obtención del grado de maestra en Gestión Integrada de cuencas realizado por Elda Barbosa Briones. En resumen abarca los estudios de cuencas, en donde la etapa de diagnóstico ofrece un panorama geográfico de donde están los problemas u hacia donde hay que dirigir los esfuerzos para conservar dichos recursos y elevar la calidad de vida de los habitantes.

Por otra parte, los SIG en la actualidad se han convertido en una herramienta muy utilizada en muchos ámbitos, debido a que permiten el manejo espacial de los datos. Un elemento fundamental de un SIG es el software, **ArcGIS** es quizás el más utilizado a nivel mundial, ya que además de la

funcionalidad ya integrada, es posible crear nuevas aplicaciones de acuerdo a las necesidades del usuario.

Este trabajo tuvo el propósito de desarrollar tres herramientas para **ArcMap** (ArcGIS Desktop) con el fin de minimizar el tiempo y costo de operación en la elaboración del diagnóstico físico y socioeconómico de una cuenca, las cuales son: Caracterización de Cuenca, Erosión Hídrica e Indicadores Poblacionales, fueron desarrolladas mediante **ArcGIS Engine** (ArcObjects) y un lenguaje de programación COM; y cuentan con información base con el objetivo de que el usuario proporcione los menos datos posibles.

A manera de validación se seleccionaron cinco microcuencas del Estado de Querétaro, donde los resultados fueron comparados con los arrojados de manera manual; y en el caso de la herramienta de Caracterización de Cuenca también fue comparada con la extensión **DetermHidro** de ArcView 3.2. Los resultados fueron satisfactorios, gracias a su excelente concordancia, además de que la herramienta indicadores poblacionales resulta ser un producto novedoso y útil ya que **ArcGIS** no cuenta con este tipo de herramienta.

2.8.3 Sistema de Información Geográfica para las Energías Renovables (SIGER) en México [25].

A través de un gran esfuerzo por la que en el año de 1997 se llamaba la GENC (Gerencia de Energías No Convencionales) y el IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas dieron inicio al proyecto SIGER con el fin de participar en el ámbito internacional de este nuevo esquema de manejo de información.

El SIGER pretendía ser un sistema compuesto por mapas en formatos raster y vectorial y datos en forma tabular, los cuales contienen información de las energías renovables y de aquellos elementos geográficos que influyen en la determinación de sitios para el aprovechamiento de las mismas. El SIGER estaría diseñado para contener información de todo el territorio nacional. La resolución espacial de los mapas es de 100 metros y en el caso de la división política llega hasta el nivel municipal.

La escala base del sistema era 1:250000; pero se contaba con información proveniente de otras escalas, como son: 1:50000 y 1:1000000. El sistema geográfico empleado es el estándar utilizado por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) en la cartografía nacional.

Con el programa **ArcView** se visualizarían los mapas de diversas formas, pues el programa cuenta con una ventana principal denominada ventana del proyecto. En ella existen cinco opciones: vistas, tablas, gráficas, layouts (presentaciones) y scripts (programas). El programa que se pretendía desarrollar o que estuvo en fase de prueba servía para visualizar varias vistas a la vez y, al mismo tiempo, ventanas de tablas, gráficos, presentaciones y programas. Esto, además de brindar facilidades para el análisis de los datos, permite hacer composiciones de diversos elementos para una buena presentación.

Por alguna razón en la transición de los gobiernos o a hechos de los cuales se carece de información el SIGER quedó solo como un buen intento de hacer un mapeo o atlas de energías renovables a con el manejo de un software para el manejo de SIG, en este caso ArcView.

2.8.4 Herramientas de SIG para el cálculo de indicadores poblacionales en cuencas Hidrográficas[26].

Una publicación del año 2015 y en donde se enfatiza la importancia del uso de los sistemas de información a través de la herramienta ArcGIS esta vez aplicado a los indicadores poblacionales delimitados por microcuencas en estado de Querétaro y a grandes rasgos habla de lo siguiente.

En el marco social de los diagnósticos de todo estudio de cuencas se debe contemplar antecedentes históricos, un análisis de la población, edades, sexo, ocupación, educación, servicios públicos, salud, infraestructura urbana e hidráulica, alimentación, organización, vivienda, religión, entre otros. La información de entrada es obtenida de las dependencias de gobiernos locales o bien de instituciones oficiales como INEGI y debe corroborarse directamente con los propios habitantes de la cuenca. Los indicadores poblacionales constituyen un instrumento para contar con información relevante y oportuna para la toma de decisiones. Estos indicadores resultan muy útiles en instrumentos de gestión como los llamados Planes Rectores de Producción y Conservación (PRPC). Se trata de un documento de gestión para dar realidad a los objetivos, las demandas y los intereses determinados en conjunto entre la población y un asesor técnico y reflejado en función de la aptitud y potencial de cada cuenca y/o micro región. Para ello, es importante contemplar factores relevantes de las localidades de la cuenca estudio, dichos indicadores están relacionado con la población, vivienda y servicios públicos, entre otros.

Un indicador es un elemento de análisis que permite evaluar, dar seguimiento y predecir tendencias de la situación de un país, un estado o una región en lo referente a su economía, sociedad, desarrollo humano, etc., así como para valorar el desempeño. En su construcción, es común emplear las siguientes variables de tipo socioeconómico (CONAPO, 2005):

- Vivienda.
- Drenaje.
- Excusado o sanitario.
- Disponibilidad de energía eléctrica.
- Disponibilidad de agua.

Ahora bien, como parte de la herramienta desarrollada, se contemplaron variables socioeconómicas que se utilizan con frecuencia por parte de INEGI y el Consejo Nacional de Población (2005):

- Tasa de crecimiento demográfico en una cuenca.
- Densidad de población en una cuenca.
- Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin drenaje ni servicio sanitario en una cuenca.
- Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de agua entubada en una cuenca.
- Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares de una cuenca sin disponibilidad de energía eléctrica en una cuenca.
- Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento en una cuenca.

2.8.5 Atlas nacional de zonas con alto potencial de energías limpias – inventario nacional de energías renovables (INERE) [27].

Este proyecto surge derivado de la reforma a la “Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética” (LAERFTE), publicada el 28 de noviembre de 2008, en su artículo 6to, fracción VI y VII, el cual establece que corresponde a la Secretaría de Energía (SENER):

...“VI. Establecer y actualizar el Inventario Nacional de las Energías Renovables, con programas a corto plazo y planes y prospectivas a mediano y largo plazo comprendidas en el Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y en la Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.

VII. Elaborar y publicar el Atlas Nacional de Zonas Factibles para desarrollar proyectos generadores de energías renovables”...

Derivado de dicha reforma la SENER y la CFE a través de su Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC) de la Dirección de Proyectos de Inversión Financiada han venido trabajando en conjunto desarrollando proyectos que cumplan con lo establecido en la ley.

Dentro de los resultados obtenidos se tiene el inventario actual, la clasificación del potencial, el inventario potencial, los mapas de potencial de los recursos renovables de energía; geotérmico, solar, eólico, oleaje y de biomasa, y el atlas de exclusiones y condicionantes.

Meta:

- Impulsar el aprovechamiento de las energías renovables en la producción de electricidad
- Orientar en la planeación de nueva infraestructura del Sistema Eléctrico Nacional

Objetivo:

Elaborar y publicar la primera etapa del Atlas Nacional de Zonas de Alto Potencial en Energías Limpias para la producción de electricidad basado en un sistema de información geográfica mediante el cual se identifiquen los sitios o zonas de alto potencial para el aprovechamiento de las energías limpias y se evalúe el potencial probable de generación eléctrica.

Capítulo [III] Metodología.

3.1 Introducción.

Desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua[28].

Se presentan los diferentes insumos y métodos utilizados para la identificación de la cuenca hidrológica (zona de estudio), se describen los datos de mediciones requeridos para su análisis; así como las herramientas geográficas para el procesamiento de la información geográfica y estadística para determinar los caudales existentes dentro de la cuenca hidrológica y conocer el potencial hídrico para la generación de energía eléctrica.

El objetivo de este capítulo es desarrollar la metodología que nos permita obtener el potencial hidráulico de las zonas de estudio de nuestro interés teniendo en cuenta dos aspectos fundamentales como son las variables geomorfológicas de cada zona de estudio y los análisis de precipitación para determinar los escurrimientos y el caudal. Ambos son importantes para la determinación del potencial hídrico para la aplicación que se desee, en este caso se espera que la aplicación sea para la generación eléctrica.

Tanto las variables morfológicas como el análisis de las precipitaciones para determinar el caudal se determinan a partir de bases de datos obtenidas de fuentes gubernamentales que cabe recalcar son de acceso público y gratuito. Estas están disponibles en los portales tanto del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través de su organismo del Sistema Meteorológico Nacional (SMN) y el Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas (CEIEG).

Las variables morfológicas se determinan obteniendo de la base de datos de INEGI a través de su página del continuo de elevaciones mexicano, un modelo digital de elevaciones (MDE) y algunas bases de datos del CEIEG. El MDE se trabaja desde un software para manejo de información geográfica en este caso usamos Qgis, el resultado de trabajar con el MDE con Qgis nos brindará la posibilidad de:

- Delimitar las zonas de estudio.
- Obtener los planos topográficos de la zona.
- Densidades de corriente.
- Perfil de la corriente principal. (Potencial hidráulico).
- Entre algunas otras características de forma de la zona de estudio.

Los datos de precipitación son obtenidos de CONAGUA a través del SMN, cabe aclarar que los datos son proporcionados tal cual como los pluviómetros registran la información, esto significa que los datos entregados no tienen algún tratamiento estadístico y de esto se encarga el trabajo en este capítulo y se detallará el estudio más adelante.

Ambos, tanto los resultados morfológicos y el análisis de la precipitación de los datos nos ayudarán a obtener el caudal de una zona particular de interés y posteriormente obtener el potencial hídrico de dicha zona.

3.2 Determinación del área de estudio (Estudio geomorfológico).

Siendo este el caso, la determinación del área de estudio esta principalmente justificada por dos factores, el primero es debido a la presencia de estaciones meteorológicas y el segundo a la existencia de estudios directos (en campo) de determinación de caudal, esto último nos permitirá establecer un control sobre el método que estamos implementando en este estudio. Básicamente en ambos casos se reduce a que el área de estudios será de gran significación siempre y cuando cuente con datos disponibles.

En Chiapas se encuentran así clasificados por la CONAGUA dos de los recursos hídricos más extensos del país siendo estos el recurso hídrico Grijalva- Usumacinta (RH-30) y el recurso hídrico Costa Chiapas (RH-23), a su vez estos contienen 12 cuencas en el orden de entre los 200 a los 7,000 km² y dentro de ellas 97 sub-cuencas en el intervalo de los 14 a los 1,500 km², con este argumento la selección del área de estudio debe comprender para los propósitos del mismo, áreas con extensiones menores a estas para su mejor manejo.

Primero con la base de datos obtenida por el servicio meteorológico nacional SMN de CONAGUA de la ubicación de las estaciones activas en el estado de Chiapas determinamos la zona de estudio considerando que se tengan datos disponibles de precipitaciones, en este caso suministradas por las estaciones meteorológicas representadas por los puntos azules en la (FIGURA 3.1), esto es trabajado con Qgis.

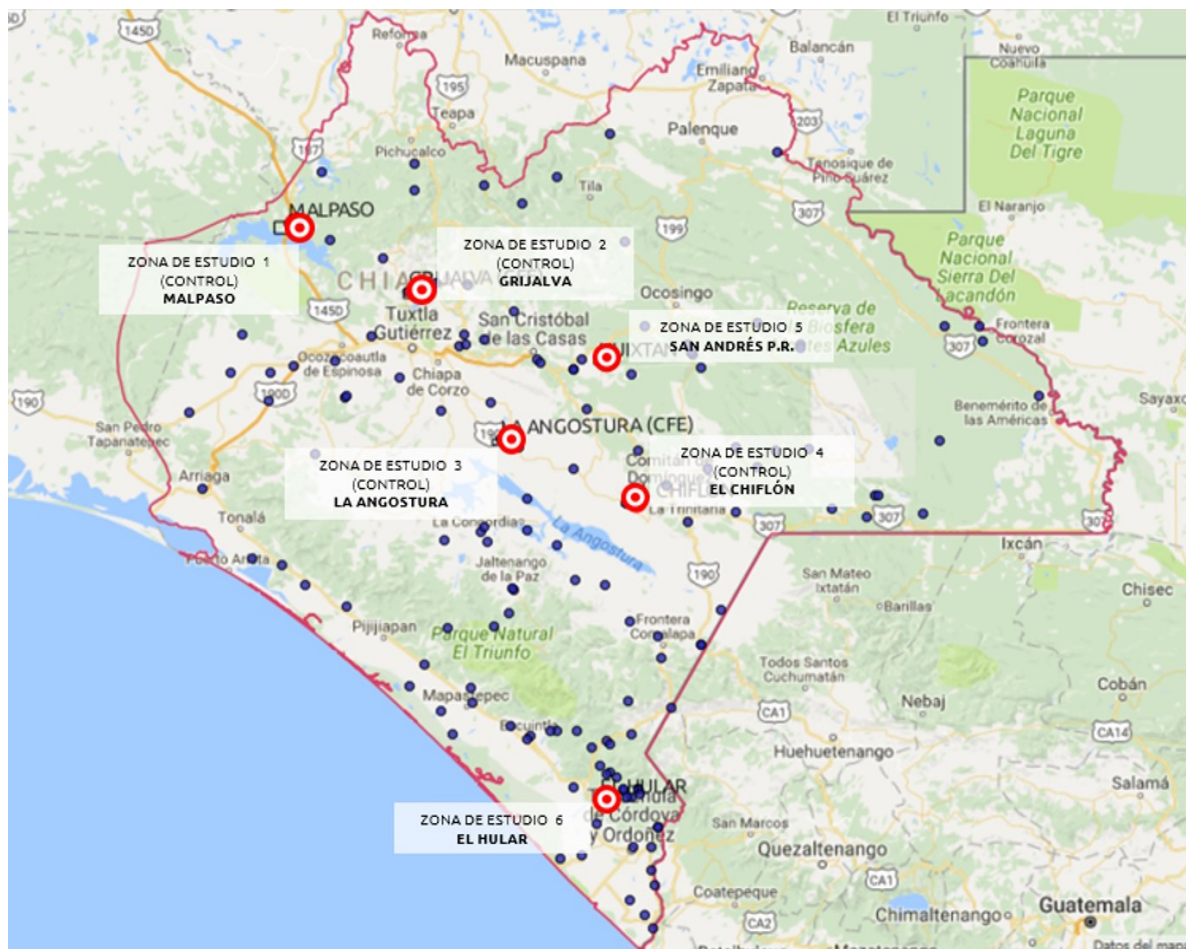


Figura III.1 Estaciones meteorológicas y zonas de estudio.

Con las zonas de estudio definidas se procede a obtener de la base de datos del INEGI un modelo digital de elevaciones MDE y con eso se delimitan las zonas de estudios a la cuales les llamaremos microcuencas, y las clasificaremos de la siguiente forma:

- Micro-cuenca MALPASO.
- Micro-cuenca GRIJALVA.
- Micro-cuenca LA ANGOSTURA.
- Micro-cuenca EL CHIFLÓN.
- Micro-cuenca SAN ÁNDRES PUERTO RICO.
- Micro-cuenca EL HULAR

Teniendo como base, parámetros de selección del área de estudio muy concretos y mencionados en los párrafos anteriores tenemos que nuestras áreas de estudios quedarán de la siguiente forma:

Tabla III.1 Clasificación de las zonas de estudio.

NOMBRE	TIPO	RECURSO HÍDRICO	AREA_KM2
• MALPASO	CONTROL	RH-30 GRIJALVA USUMACINTA	90.43
• GRIJALVA	CONTROL	RH-30 GRIJALVA USUMACINTA	80.75
• LA ANGOSTURA	CONTROL	RH-30 GRIJALVA USUMACINTA	93.56
• EL CHIFLON	CONTROL	RH-30 GRIJALVA USUMACINTA	65.22
• SAN ANDRÉS		RH-30 GRIJALVA USUMACINTA	31.34
• EL HULAR		RH-23 COSTA CHIAPAS	43.95

3.3 Datos de precipitación y su análisis.

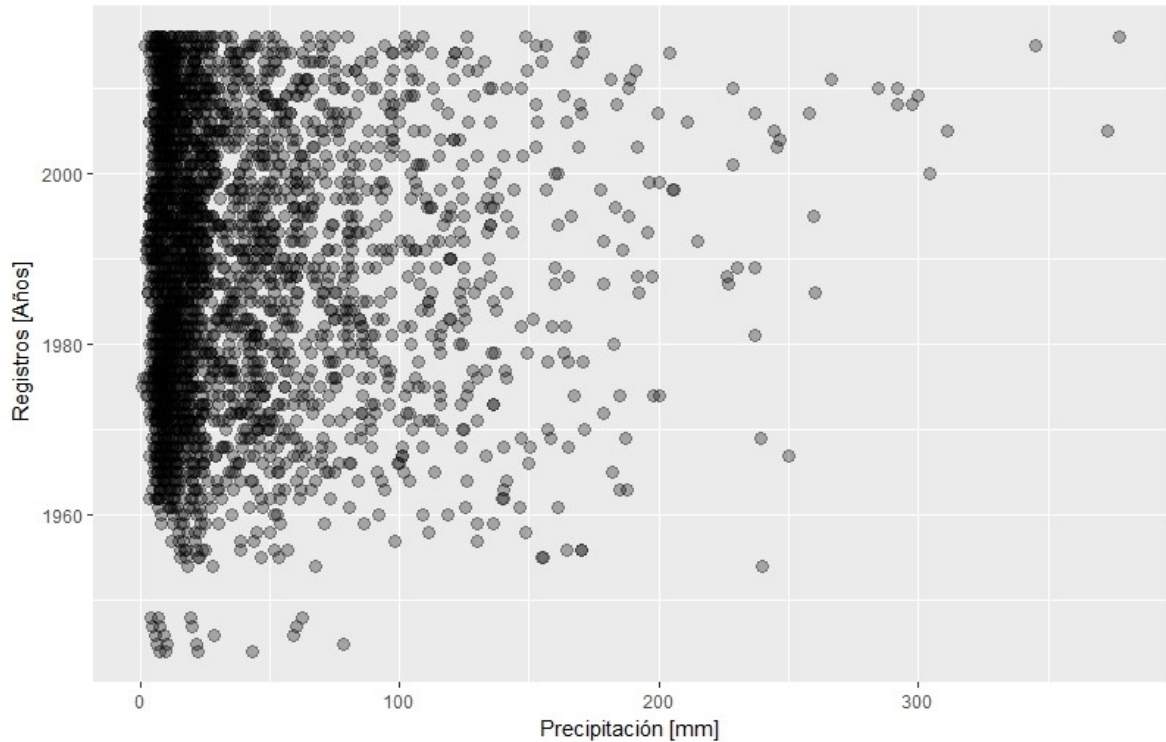
Se obtuvieron datos de precipitaciones de quince estaciones pluviométricas a lo largo de las seis zonas de estudio que elegimos para nuestro propósito de investigación, estos datos son registros tomados para la mayoría de los casos desde los años 1944 a 2016 y son registros que van desde los pocos milímetros de precipitación (0.5 mm) y superando hasta los 400 mm Más de 5,000 datos de precipitaciones son los analizados en este trabajo.

Se hace notar como primer punto la importancia de los datos de precipitación obtenidos de CONAGUA, datos en bruto, sin tratamiento estadístico alguno, los cuales son representados en la gráfica 4.2.1. En donde se observa que cada punto representado sobre la gráfica es un registro de precipitación en un año específico la opacidad de cada punto demuestra con qué relación se concentran las precipitaciones, a menor opacidad más concentración de registros de precipitación existen y por el contrario a mayor opacidad los eventos son menos recurrentes.

En relación a la recurrencia de los eventos este grafico también permite observar algo crucial, siendo que las precipitaciones menos recurrentes son las rebasan los valores de 150 mm de lluvia registrados, quiere decir que estos eventos a través del tiempo son esporádicos y aquí es donde entra el concepto de *precipitaciones máximas extraordinarias*.

3.3.1 Precipitaciones máximas extraordinarias.

Si bien en el capítulo III correspondiente a la metodología no se tocó el tema de las precipitaciones máximas extraordinarias, en este punto cabe hacer un alto y considerar la comprensión de este concepto, previendo la importancia de este en el trabajo del tratamiento de los datos de manera estadística.



Gráfica III.1 Registro de precipitaciones en las zonas de estudio.

En el contexto de nuestras zonas de estudio la gráfica 3.3.1 muestra de manera análoga las precipitaciones registradas, clasificadas por las estaciones meteorológicas cercanas a nuestras zonas de estudio, esto con el propósito de ilustrar la distribución de precipitación en cada una de las zonas, ya que están distantes una de otras y con condiciones climatológicas diversas.

Si hablamos de conceptos estadísticos es preciso hablar de las medidas de centralización, que a groso modo son los que nos dan la representatividad de nuestros datos, es decir, los que nos dan idea que como se espera que un evento se comporten en relación a la muestra total. Las medidas de centralización más usadas son:

- La media.
- La mediana.
- La moda.

De qué manera se relacionan estas medidas de centralización con el concepto de *precipitación máxima extraordinaria*, pues bien, cuando hablamos de una muestra hablamos de una serie de datos, más precisamente y para nuestro efecto hablamos de datos cuantitativos, que se distribuyen a través de la presencia de eventos recurrentes, tales como la precipitaciones que este trabajo analizan, pero pudiendo ser cualquier otro tipo de eventos, como por ejemplo, las calificaciones de un estudiante, el clima de una ciudad, etc. Estos datos como es de esperarse fluctúan entre valores máximos y mínimos, los cuales según su recurrencia y eventualidad nos darán una mejor idea de cómo se comporta el evento que estemos analizando, siendo este el caso, la lluvia.

Con eventualidad se quiere decir que en presencia de un evento que no es frecuente, nuestra medida de tendencia central nos dará un promedio del comportamiento general tomando en cuenta este evento que no es frecuente, por ejemplo:

Analicemos dos registros muy similares, dos registros de lluvia, el primer registro la precipitación se comporta como se muestra en la tabla 4.1 con un valor mínimo de 12.00 mm y un valor máximo de 22.50 mm y la media de la muestra es 15.075 mm, este último valor nos da idea de cómo puede presentarse un evento en promedio para dicha muestra.

El segundo registro representado en la tabla 4.2 se muestra una distribución similar pero con un valor discordante marcado en rojo, ahora esta distribución presenta un mínimo similar de 12.00 mm al caso anterior y un valor máximo de 402.50 mm vemos como ese valor máximo alteró el valor promedio de la muestra dado que ahora tiene un recorrido mucho más grande desde el mínimo hasta el máximo, en comparación del primer registro, teniendo un valor medio de 110.075 mm

Tabla III.2 Registro de precipitaciones para el ejemplo.

Precipitaciones [mm]	
Evento 1	12.00
Evento 2	22.50
Evento 3	10.50
Evento 4	15.30
Media ()	15.075

Tabla III.3 Registro de precipitaciones para el ejemplo con evento máximo.

Precipitaciones [mm]	
Evento 1	12.00
Evento 2	402.50
Evento 3	10.50
Evento 4	15.30
Media ()	110.075

Aclaremos que lo anterior es solo un ejemplo para evidenciar la capacidad que los valores de *precipitaciones máximas extraordinarias* le producen a las medidas de centralización de nuestra muestra, en este caso la media pasando de 15.075 mm a 110.075 mm, Observemos que como la presencia de un solo dato de *precipitación máxima extraordinaria* fue la causa de esta discordancia de datos.

En estadística a estos datos se les conoce como: *outliers, valores aberrantes o discordantes* y con ellos hay que tener cuidado al momento de analizar una serie de datos ya que el correcto análisis de estos nos dará la representatividad de nuestra muestra al momento de tomar la decisión sobre qué valor tomaremos para dimensionar o calcular lo que nuestro objeto de estudio requiera para su cumplimiento.

3.3.2 Tratamiento de los datos de precipitación.

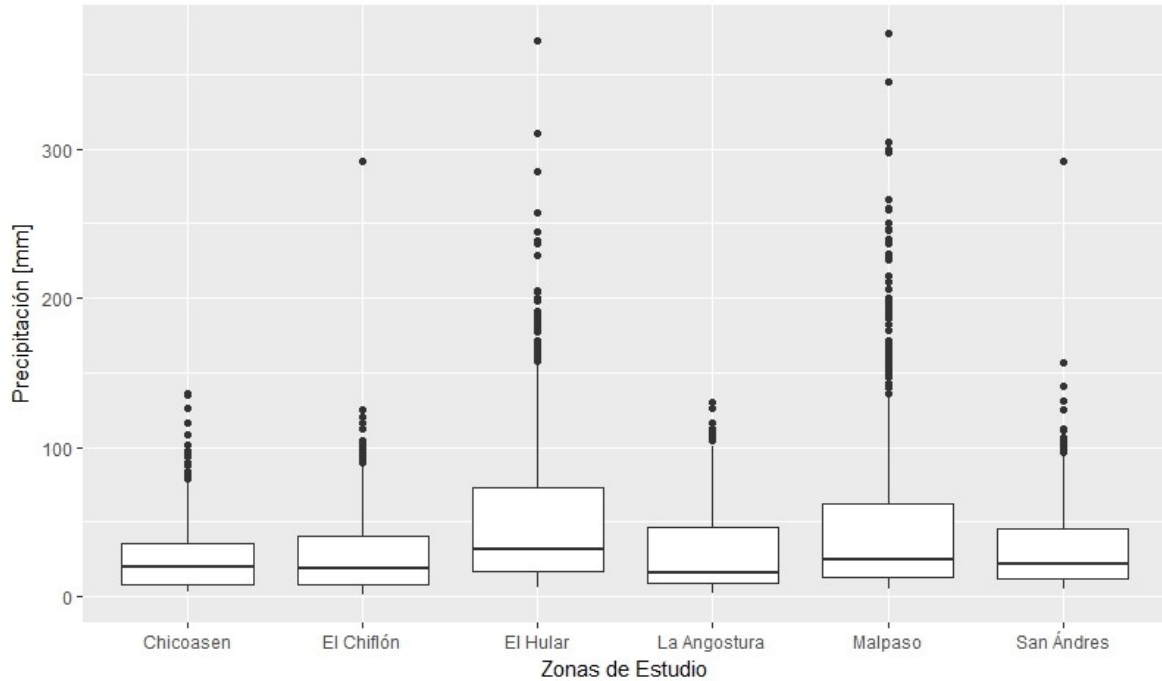
El tratamiento de los datos correspondientes a las precipitaciones, es básicamente seleccionar los valores de interés y eliminar las precipitaciones máximas extraordinarias u outliers, para evitar que nuestro valor de centralización (media) sea lo más representativo posible al comportamiento del espacio muestral que se analizara.

Esta eliminación de los datos aberrantes perjudiciales para la media no es más que la eliminación de los valores superiores al percentil 90 de cada muestra. El siguiente gráfico (gráfico 1.1) es un gráfico llamado de cajas o comúnmente *boxplot* este gráfico muestra la distribución de nuestros datos en percentiles.

Las cajas nos muestran el recorrido inter-cuartílico es decir la altura de la caja está limitada desde el percentil 25 al 75 de nuestra muestra, prácticamente acá dentro de esta caja se encuentran concentrados el 50% de los datos de la muestra más representativos, los valores cercanos a la media, en efecto el gráfico muestra una línea que divide la caja en dos partes esta línea que divide la caja en dos es el percentil 50, en otras palabras la mediana, y la interpretación que se le da a esto es que la mediana divide la muestra exactamente por la mitad, debajo de ella están concentrados el 50% del total de todos los valores de la muestra e intuitivamente sobre ella se encuentra el restante 50% de esos datos. Es preciso hacer notar que el ancho de caja no tiene ningún valor representativo. Por debajo de la caja se encuentra una línea muy pequeña a la cual se le denomina bigote o *whisker*, la longitud de este *whisker* va desde el valor mínimo de la muestra hasta el cuartil 25, acá se encuentra el 25% de los valores cercanos al límite mínimo y para el bigote superior o *whisker* superior ocurre lo mismo solo con la diferencia que su recorrido va desde el percentil 75 hasta el percentil 90, acá solo se encuentran 15% de los valores de la muestra cercanos al valor máximo.

Lo más importante del gráfico son los puntos negros situados por arriba de los elementos se describieron en el anterior párrafo (la caja y los bigotes), estos puntos nos indican los valores aberrantes de la muestra u outliers, estos valores para nuestro caso, son valores de *precipitaciones*

máximas extraordinarias valores que no se comportan de manera representativa a la muestra total, sucesos eventuales, estos valores son precisamente los que buscamos eliminar para evitar que la media, sea lo más representativa a todo el grueso de los datos, prácticamente esto es el tratamiento de datos que se le da a la muestra, se realizó para cada estación.



Gráfica III.2 Distribución Boxplot de las precipitaciones por cuenca.

Estos valores fueron tratados con ayuda del software R del R-project, al eliminarse estos datos nos quedaron prácticamente dos tipos de valores que a su vez contienen una clasificación dentro de sí. Como en la siguiente figura 3.3.2.1 se puede observar los datos quedaron de la siguiente manera.

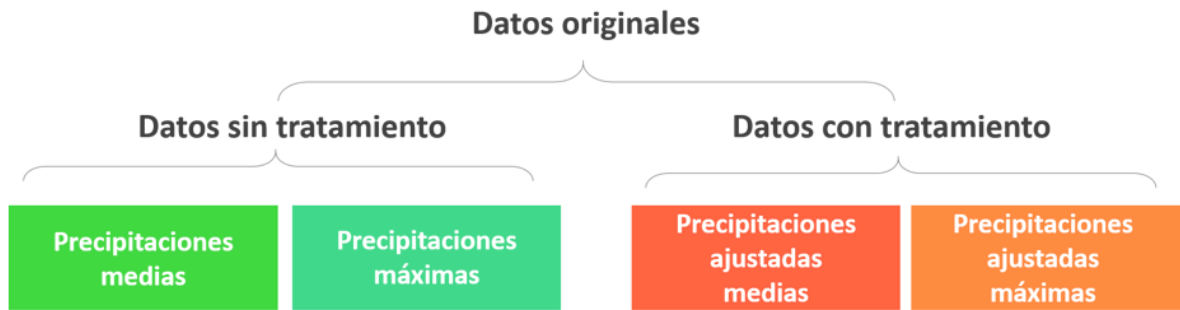
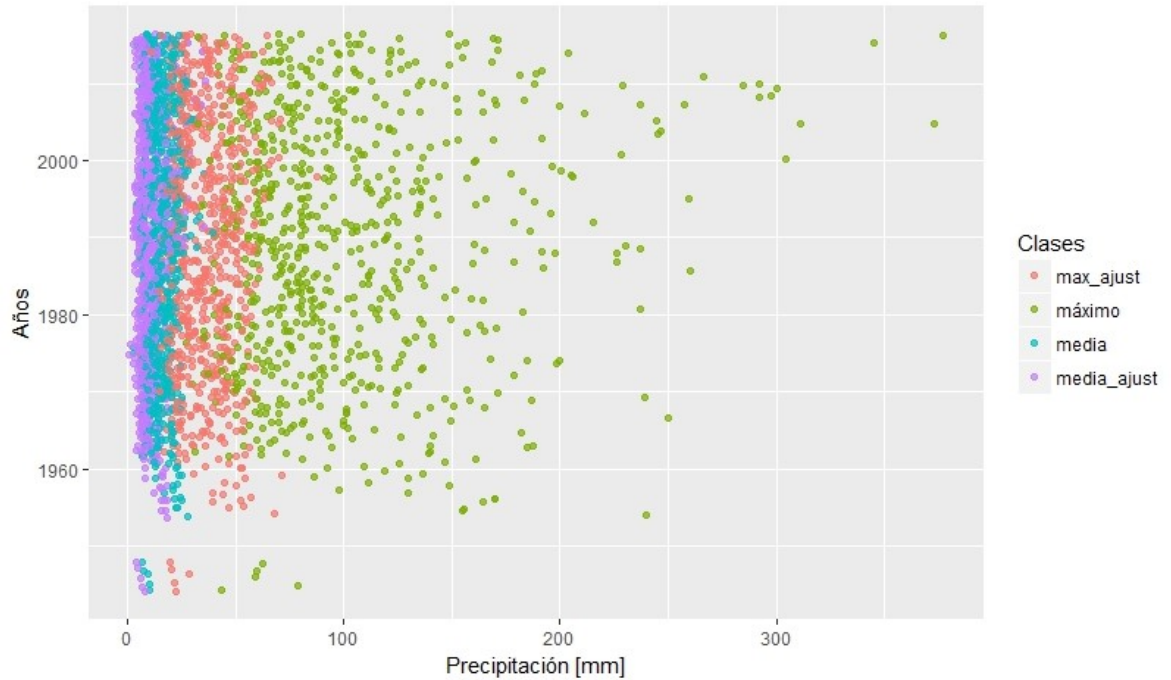


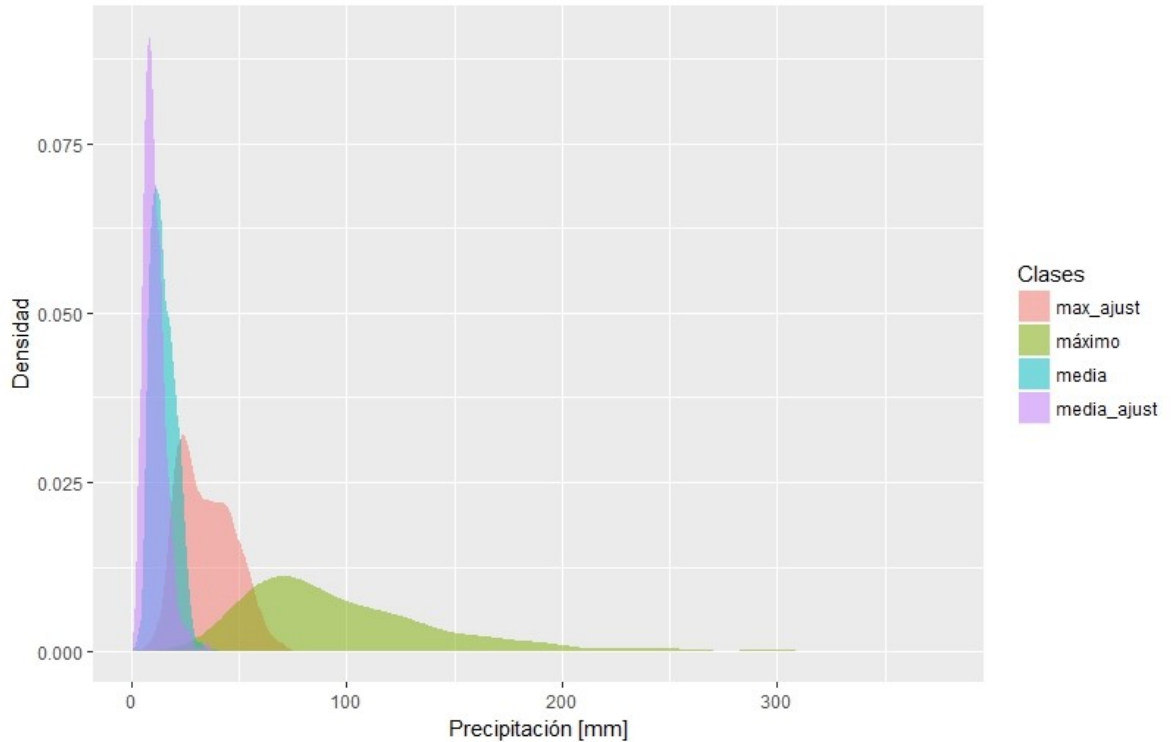
Figura III.2 Clasificación de los datos.

El propósito de distribuir de esa manera los datos se debe a dos aspectos importantes que hay que tomar en cuenta para la evaluación de proyectos, siendo este el caso, para proyectos de micro-generación. Por una parte seguiremos manejando los datos sin tratamiento ya que ellos son importantes para determinar los valores de los caudales máximos que se utilizan con propósitos de construcción de infraestructura de los proyectos y para evitar posibles inundaciones que afecten a estos. Por otra parte los valores tratados nos brindan una muestra mucho más representativa para como se espera que nuestros eventos se comporten de manera regular o promedio y esto básicamente nos servirá para dimensionar la turbina para la transformación de la energía hidráulica en energía eléctrica, a su vez cada una de ellas se subdivide en valores promedio (medias) y valores máximos, esto con el mismo propósito que la subdivisión anterior, obtener valores representativos comunes en época de estiaje para el dimensionamiento de la turbina de generación (media) y valores para la proyección de infraestructura (máximos).



Gráfica III.3 Precipitaciones por clases.

En la (gráfica 1.2.) se muestran representados las cuatro clasificaciones de datos con los que se trabajó los modelos estadísticos para la obtención de los caudales de diseño, tanto para turbinas e infraestructura, comparándose entre ellos mismos para ver las diferencias notorias entre cada grupo de nuevos datos. Siendo así en la gráfica se observa como los valores máximos sin tratar (puntos verde olivo) etiquetados como máximo, están dispersos y en valores superiores a los 50 mm, también se observa como los valores máximos con ajuste (puntos rojos) etiquetados como max_ajust le preceden encontrándose confinados en una región y finalmente observamos como los valores medios sin tratamiento (puntos color cian) y etiquetados como media y los valores medios ajustados (puntos color púrpura) y etiquetados como media_ajust se encuentran muy concentrado en valores muy bajos y muy compactos esto denota mucha más representatividad de los mismos.



Gráfica III.4 Distribución de las precipitaciones por clases.

En la figura 3.3.2.4 se muestra la distribución de los datos en una gráfica de densidades de probabilidad y se hace evidente el hecho que se viene marcando desde los párrafos anteriores; a ser, la densidad para los valores máximos ya sea con tratamiento o no son muy bajos del orden del 2.5% en sus valores máximos y para los valores de las medias (con tratamiento o no) son del orden cercano al 10%. Esto hace evidente que los valores más frecuentes o más recurrentes son los descritos por los valores de la media de la muestra, se puede decir que en condiciones normales, para la región de análisis se puede esperar que las precipitaciones se comporten muy parecido a esos valores.

Desde el punto de vista tradicional o convencional si se le puede llamar de esa manera, la forma de encarar un proyecto de generación o micro generación, está reglamentada

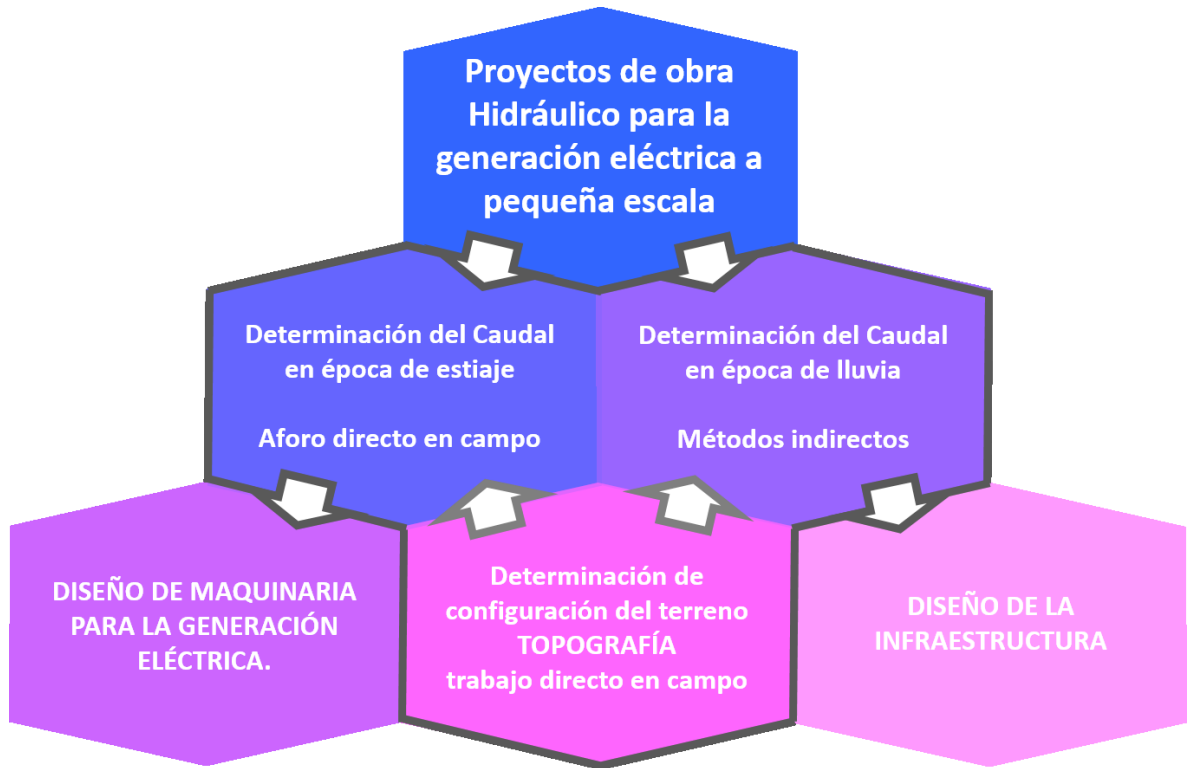


Figura III.3 Enfoque de un proyecto hidráulico convencional.

3.4 Análisis de los casos particulares (zonas de estudios).

En los incisos anteriores se describió los procedimientos para la obtención de los datos geomorfológicos y el tratamiento estadístico para su análisis, en este capítulo se presentarán los resultados para los casos particulares de cada una de nuestras zonas de estudio, detallaremos el análisis particular para la zona de estudios etiquetada como micro-cuenca “*El Chiflón*” debido a que ya existe un estudio previo realizado en campo y el cual permitirá comparar la fiabilidad de nuestro método.

3.4.1 Descripción geomorfológica Micro-cuenca el Chiflón (zona de estudio)

La cuenca del chiflón se localiza en el estado de Chiapas al sur-este de México en una latitud $16^{\circ}11'03''$ N y longitud $92^{\circ}17'15''$ W, se eligió esta zona por tres criterios principales, los dos primeros están sustentados en los requerimientos que nuestra metodología propone y los cuales son: la disposición de recurso natural, (corrientes perennes) y por otro lado la cercanía de estaciones meteorológicas que proporcionen datos de precipitación para el análisis y la estimación del caudal y el último criterio de selección que para este caso es el más importante fue que en un trabajo anterior Reinier Fenton Peñalver en su trabajo de investigación de maestría * determino los caudales tanto en época de estiaje como para avenidas máximas para el posible proyecto de una micro-hidroeléctrica, estos estudios servirán como comparativo y control de la propuesta metodológica acá presentada.

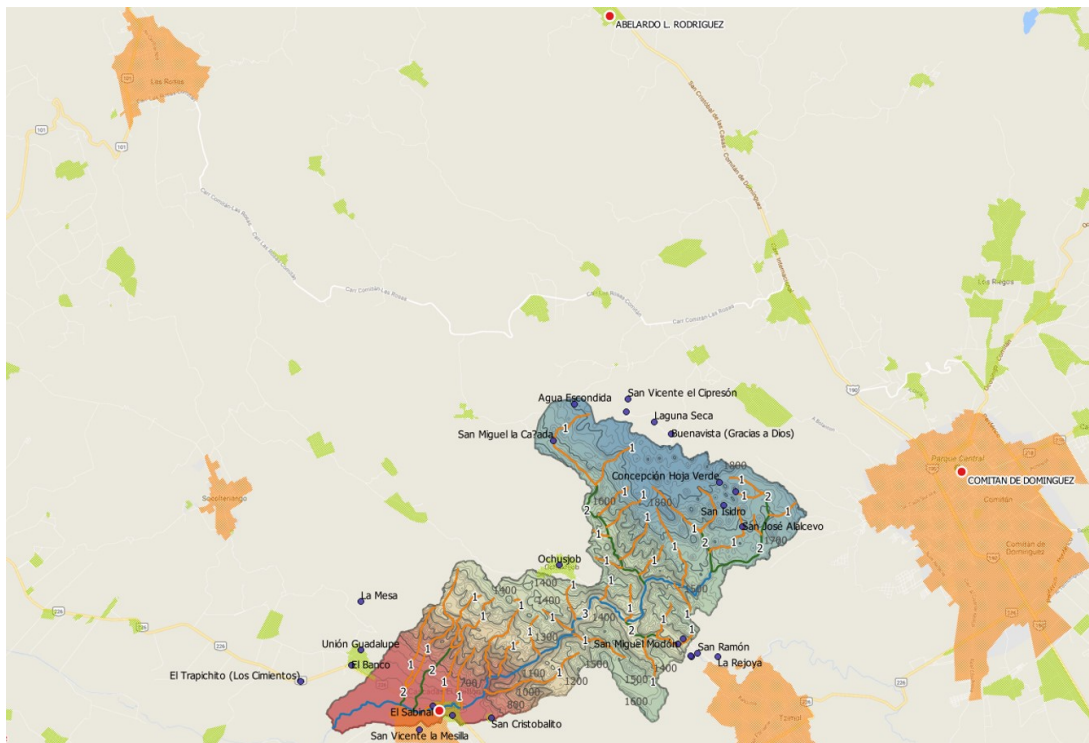


Figura III.4 Mapa de la zona de estudios “El Chiflón” y sus estaciones meteorológicas de influencia.

En la figura 3.4.1.1 se muestra un mapa en donde se observa la zona de estudio a la que nos referimos y a su vez denotados con puntos rojos las estaciones meteorológicas que nos brindarán los datos de precipitación para nuestro análisis, con los procesos y métodos vistos en el capítulo III, obtendremos la caracterización de la zona de estudio, su configuración topográfica, el perfil de su cauce principal, las ordenes de sus corrientes, etc.

Esta configuración se observa más detalladamente en la figura 3.4.1.2, todas las características geomorfológicas se resumen en el mapa representado en dicha figura y a partir de ahí y con los métodos descritos en el capítulo III se obtienen los datos necesarios que nos servirán para determinar el caudal de dicha zona.

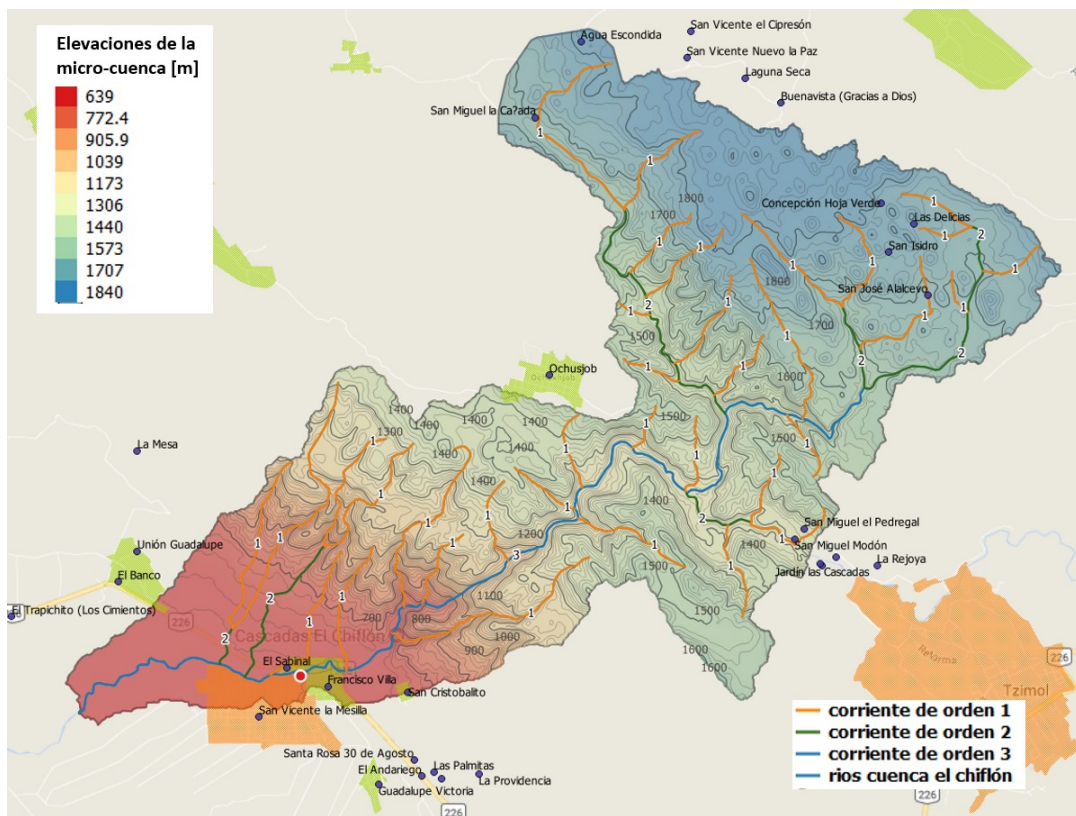
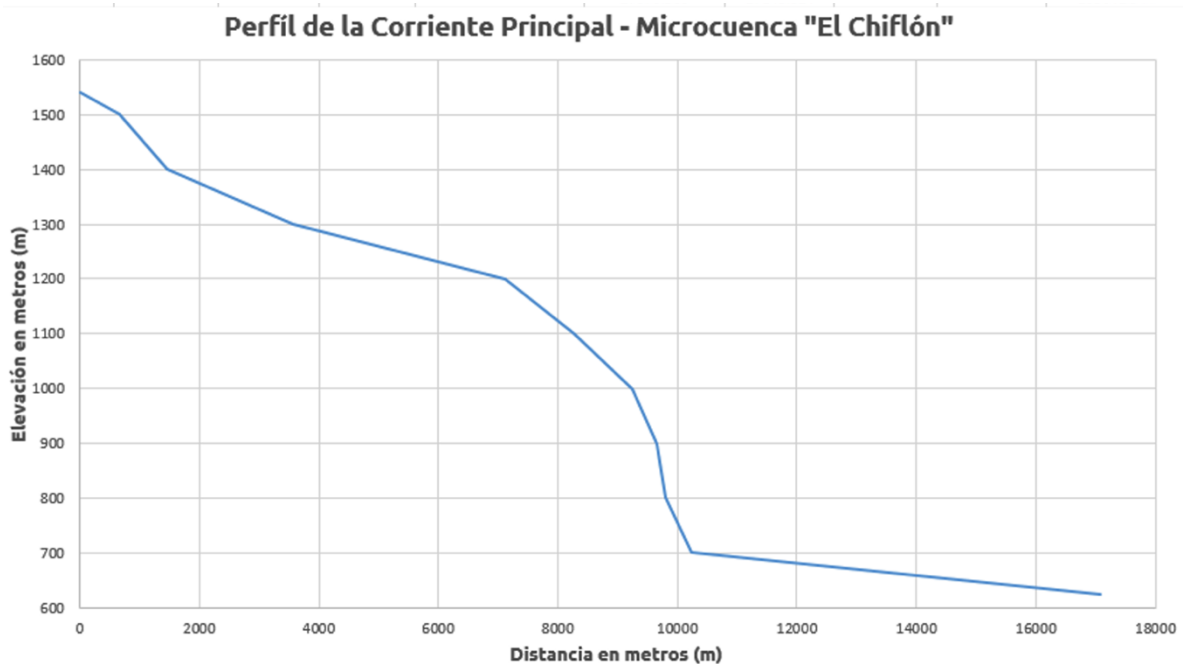


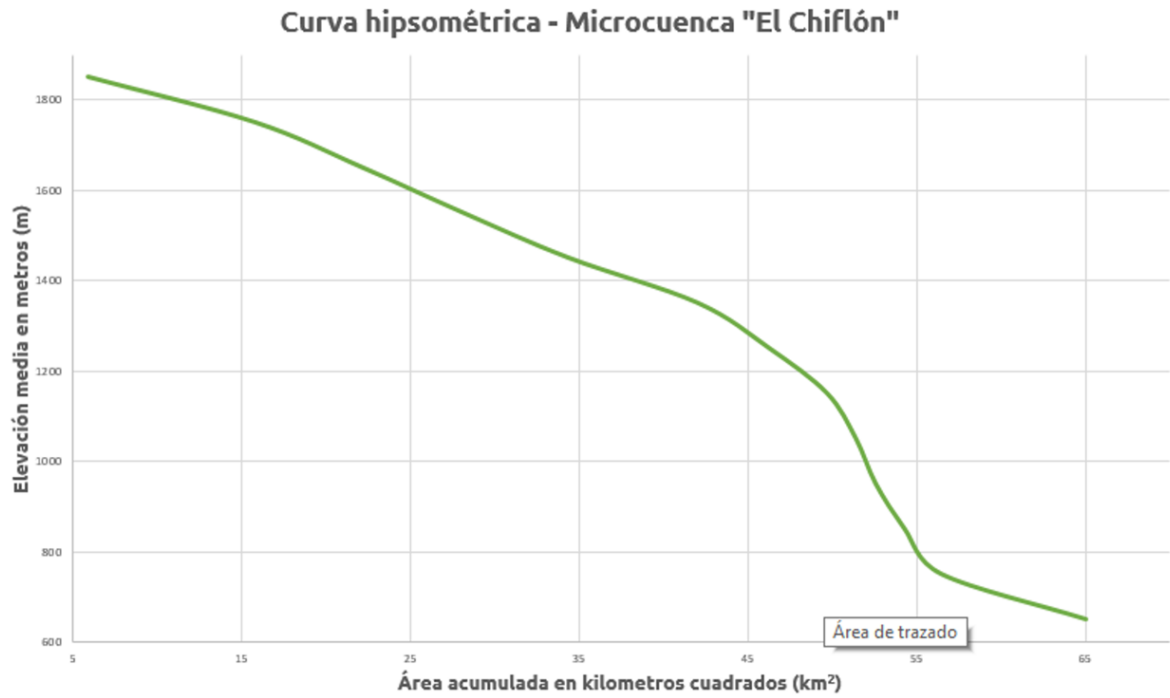
Figura III.5 Zona de estudio El Chiflón.

Extraídas del MDE (modelo digital de elevación) se obtienen tanto el mapa mostrado en la figura anterior y las gráficas que describen el perfil del cauce principal y la curva hipsométrica. El conocer el perfil de nuestra corriente principal es de interés para nuestro estudio ya que con esto podemos determinar el salto hidráulico o altura de potencial que es un dato que nos servirá al momento de determinar el potencial hídrico la gráfica nos muestra el perfil del cauce principal de este caso.



Gráfica III.5 Perfil de la corriente principal El Chiflón.

Por otra parte en la gráfica, segmentos áreas de la micro-cuenca varían con respecto a la elevación media de la cuenca, es decir la elevación que cada segmento sube con respecto a otro y está delimitado por la distribución de las curvas de nivel, a esto como se dijo en el capítulo III se le llama curva hipsométrica y lo que representa esta gráfica es el grado de erosión que pueda tener la misma con respecto a su configuración topográfica y que es un factor que a los escurrimientos afecta directamente de igual forma nos determina que tan longeva es nuestra zona de estudio, sin pasar por alto que tiene otras aplicaciones como para poder determinar niveles para proyección de embalses y zonas inundables.



Gráfica III.6 Curva hipsométrica El Chiflón.

Lo anterior puede resumirse en la tabla en donde se concentran muchos datos de interés para los propósitos de este trabajo.

A) Generalidades de la cuenca.

Ac=	65.218 km ²	área de la cuenca
Pc=	61.256 km	perímetro de la cuenca
Elev. Máx =	1840 m	elevación máxima
Elev. Mín =	639 m	elevación mínima

B) Forma de la cuenca.

Kc=	2.14	índice de gravelius
-----	------	---------------------

C) Sistema de drenaje.

Ordenes de las corrientes	(ver mapa y tabla de corrientes y escurrimientos)	
Dd=	1.45 km/km ²	densidad de drenaje
Dc=	0.66	densidad de corriente

D) Caracterización del Relieve de la cuenca

Sc=	0.79	Pendiente media (Criterio de Alvord)
Curva Hipsométrica	(ver tabla de áreas triburarias y grafico de curva)	
Em=	1355.67 m	Elevación media de la cuenca
St=	2.45 %	Pendiente Taylor y Schwarz

E) Clasificación de la cuenca

RH-30 GRIJALVA - USUMACINTA	
CUENCA R. GRIJALVA - LA CONCORD	13196.21 km ²
SUBCUENCA R. AGUACATENCO	2258.06 km ²
MICROCUENCA EL CHIFLÓN	65.22 km ²
TIPO ABIERTA - CLASIFICACIÓN RH-30Fa	

Figura III.6 Datos geomorfológicos El Chiflón.

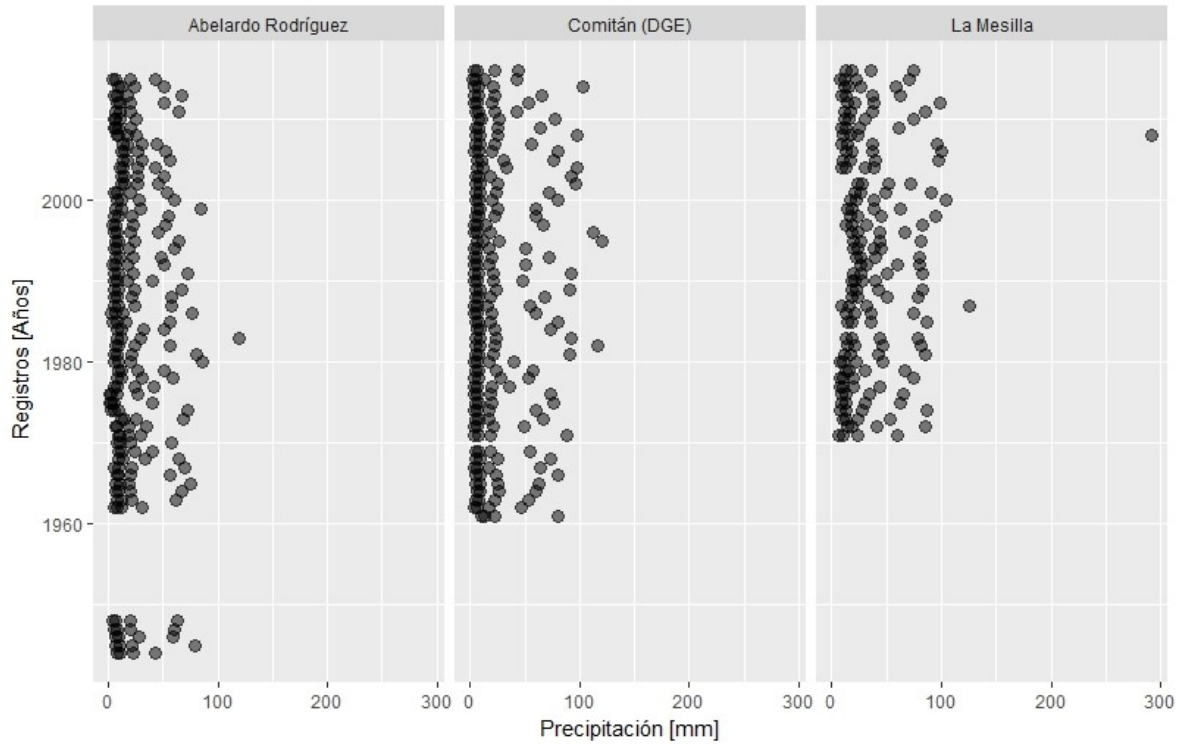
De esta serie de datos donde todos son de relevancia, en los procesos siguientes usaremos el área de la cuenca, la pendiente (st) y el salto hidráulico, son embargo los datos ya fueron obtenidos para su posterior uso.

3.4.2 Obtención del caudal.

El análisis estadístico descrito en la introducción de este capítulo y la metodología de los procesos estadísticos para la determinación de las precipitaciones y caudales así como sus tiempos de retorno fueron descritos en el capítulo III de este trabajo, ambas descripciones nos sirven para argumentar esta parte del trabajo.

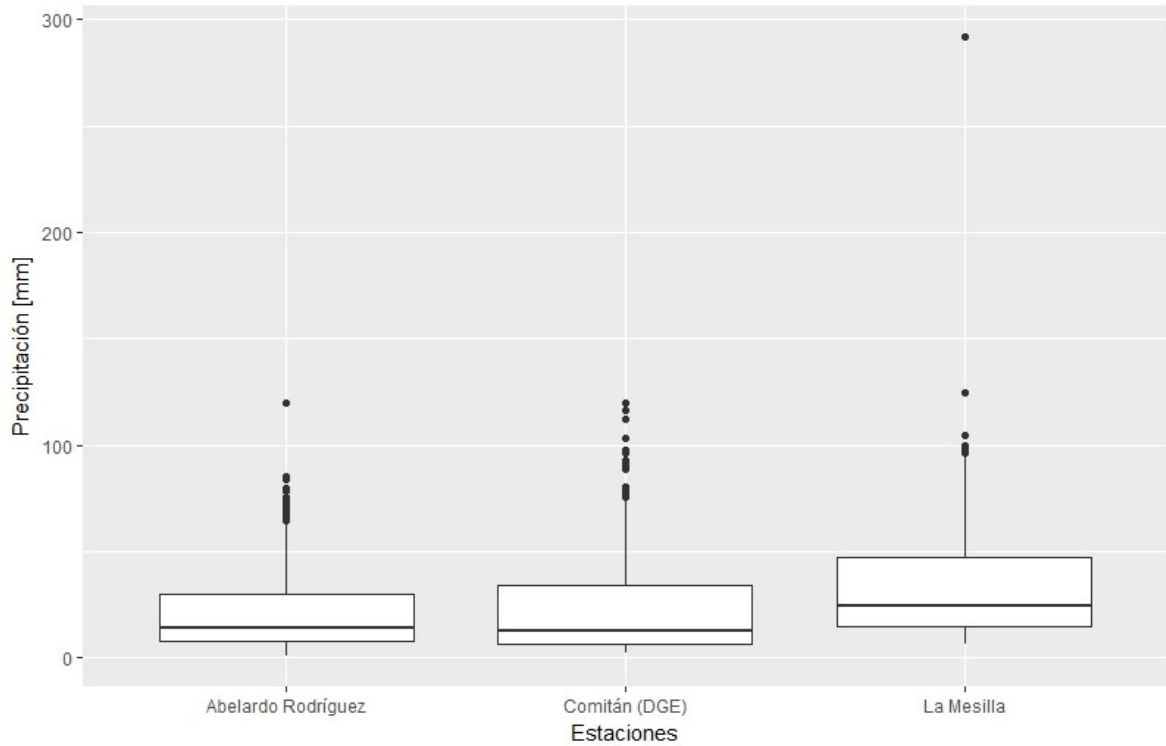
En la (gráfica) se muestran las precipitaciones registradas en cada una de las estaciones de la microcuenca de estudio “El Chiflón”, observamos que la distribución de estas a lo largo del tiempo es discontinua, es decir faltan datos por lo que las tres muestras no son homogéneas.

La estación Abelardo Rodríguez, presenta un faltante de datos desde 1948 hasta 1962, la estación Comitán (DGE) presenta un registro faltante en el año de 1970 y la estación La Mesilla tiene un registro faltante en el año 2002. Los tres registros de precipitaciones comienzan a registrar eventos en años diferentes por lo cual el *primer criterio* de homogenización es recortar todos los registros a la muestra más pequeña (La Mesilla), eso permitirá la correlación entre estaciones para complementar los datos faltantes.



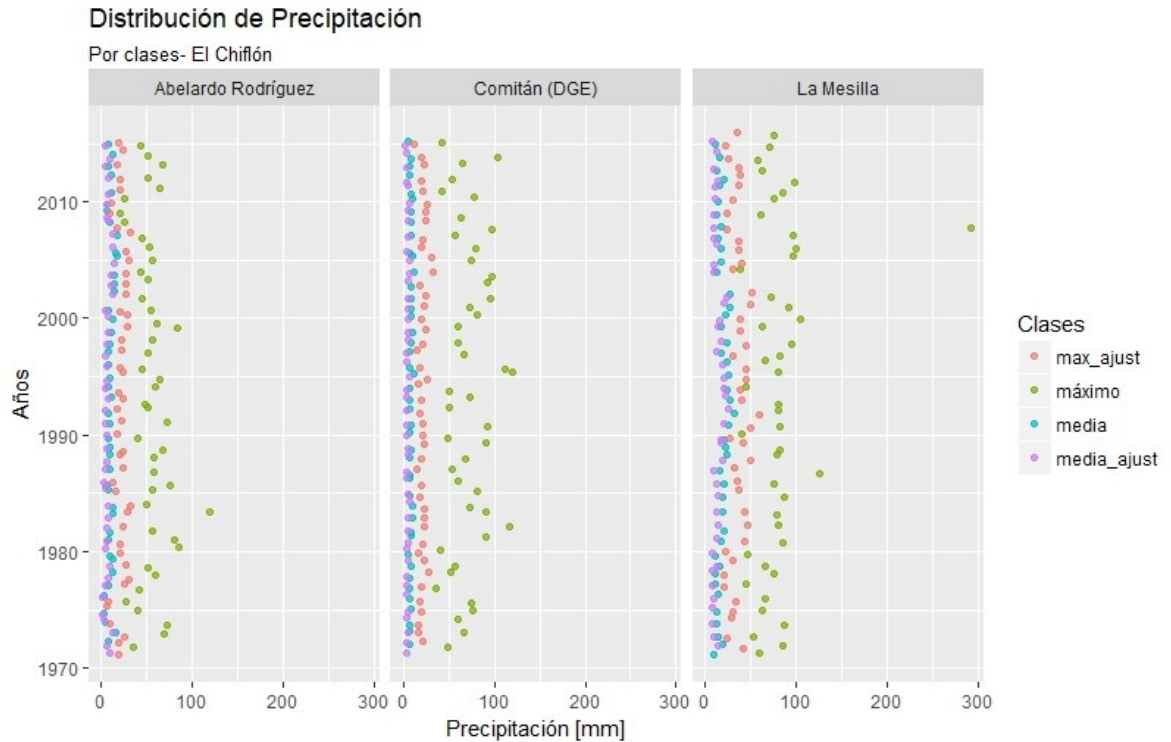
Gráfica III.7 Precipitaciones por estación en la cuenca El Chiflón.

El *segundo criterio* de tratamiento de datos es el relacionado con las precipitaciones máximas extraordinarias y la eliminación de estos datos, en la siguiente gráfica se muestran las tres estaciones meteorológicas y su distribución en un diagrama boxplot, para determinar los valores *outliers* de cada una de ellas. Con valores máximos cercanos a los 300 mm en una de ellas, este diagrama como ya se dijo con anterioridad nos sirve para depurar los datos clasificarlos de tal manera que nos permitan realizar un mejor análisis de acuerdo al propósito buscado por esta investigación.



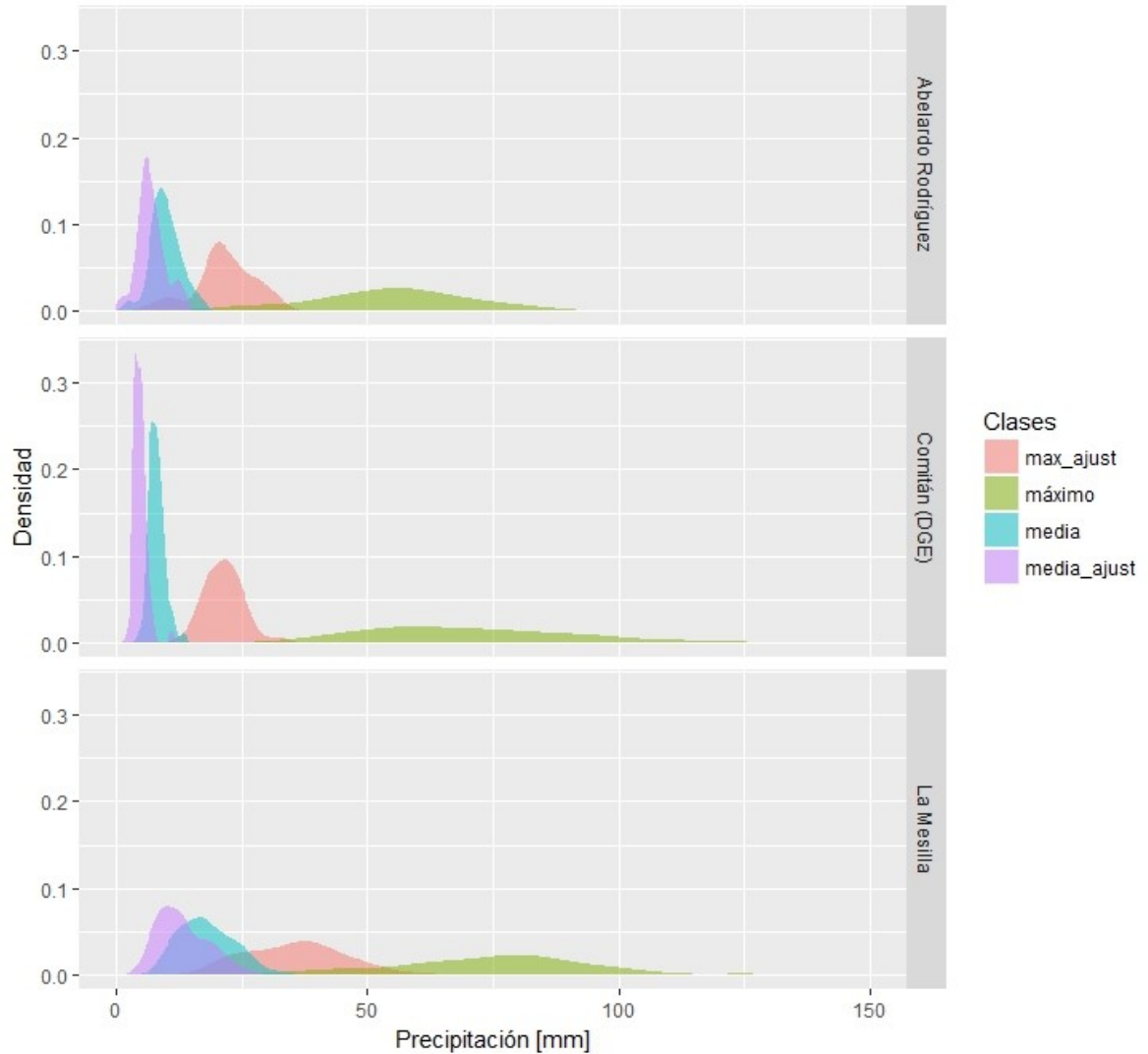
Gráfica III.8 Distribución de los eventos de la cuenca El Chiflón (Boxplot).

Ya depurados los datos se puede observar en el (grafico) como estas se comportan de una manera muy característica dejando ver con la dispersión de cada uno de los puntos que tan probables pueden llegar a ser los mismos, en verde tenemos las precipitaciones máximas, se observa en el gráfico mucha dispersión de los mismos mientras que los valores de las medias, ya sean con tratamiento o no se mantienen muy concentrados cercanos a los valores muy pequeños del orden de los 9 mm de lluvia.



Gráfica III.9 Distribución de los eventos homogeneizados.

En el (gráfico) se presenta un diagrama de precipitaciones contra densidades de probabilidad. Esta gráfica hace más evidente las probabilidades de ocurrencia de algún evento, en este caso de los eventos de precipitación que hemos analizado, de modo general se observan que los eventos con mayor densidad de probabilidad de ocurrencia son los eventos de los valores de la media con tratamiento (color púrpura) en donde sus densidades de ocurrencia fluctúan entre 0.08 a 0.30 (8% a 30%) esto para valores de precipitación muy pequeñas, del orden de 8 mm. Los valores menos probables y ese mismo sentido (general) son los valores máximos sin tratamiento (color verde) y en las cuales sus densidades de probabilidad fluctúan con valores de entre 0.02 a 0.03 (2% a 3%) esto para valores de precipitación de entre los 50 mm y los 80 mm.

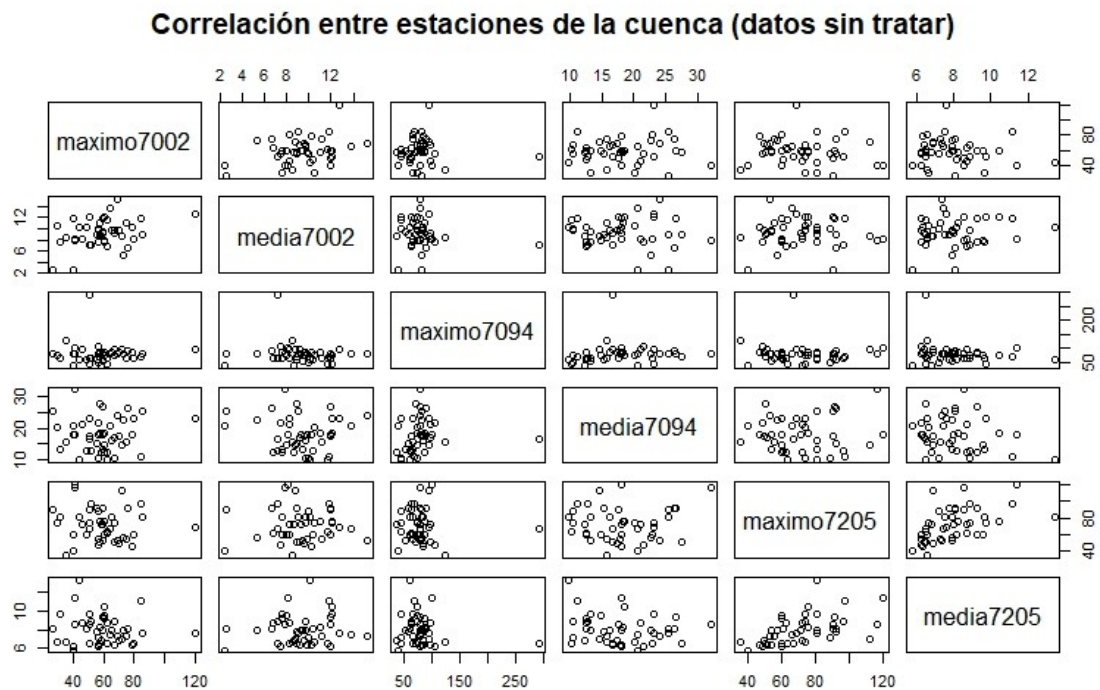


Gráfica III.10 Distribución de las densidades de precipitación por clases.

Otra cosa que cabe hacer notar de este FIGURA 3.4.1.8 es que los registros en él empiezan a partir del año 1972 y hasta el 2016, ya en este punto los datos de nuestras tres estaciones están homogeneizados es decir recortados a un mismo tamaño muestral, sin embargo, ocurre un hecho y el cual es que algunas estaciones carecen de registros en ciertos años siendo los casos de la estación “la mesilla” donde hacen falta el dato del año 2002 y la estación “Abelardo Rodríguez” en donde hace falta el dato del año 1989, siendo estos los casos es necesario autocompletar los datos para un mejor manejo estadístico de los datos.

3.4.3 Completado de datos de precipitación faltantes.

La técnica más usada en estos casos para el autocompletado de la información faltante se hace correlacionando datos y la cual es ilustrada en el libro de Martin Aparicio, en su apartado de escurrimientos y deducción de datos faltantes [28] y en donde de manera muy general correlaciona los datos de precipitación de estaciones cercanas a modo verificar si los registros de precipitación de ambas estaciones tienen un índice de correlación aceptable (altamente correlacionados) eso es analizado a través de 2 métodos, método de correlación lineal y método de correlación de Pearson.



Gráfica III.11 Correlación entre estaciones de la cuenca datos sin tratar.

En la FIGURA 3.4.3.1 se correlacionan una a una las tres estaciones meteorológicas cercanas a nuestra zona de interés, existen dos formas de determinar la correlación de datos entre dos muestras, una es de forma gráfica, observando el comportamiento de los datos con relación a la dispersión y los patrones que forman estos y la otra forma es de manera analítica, se observan el comportamiento sistemático de los dos conjuntos de variables a través de la covarianza y las desviaciones estándar, las cuales son descritas por las siguientes ecuaciones.

$$S_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{n} \quad (\text{III-1})$$

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (\text{III-2})$$

Veamos la manera en que gráficamente se puede dar un indicio de correlación entre dos muestras, en el grafico anterior, se observan todas las correlaciones de las estaciones de la cuenca bajo análisis, cada casilla que tienen la concentración de puntos en su interior correspondiente a el comparativo entre estaciones, a simple vista no se puede determinar el grado de correlación que hay en cada uno de estas comparativas, sin embargo ya se dejan ver algunos indicios de correlación en algunas casillas.

El indicio contundente de la correlación entre datos de las estaciones viene dada por el análisis analítico de esta dispersión a través de las ecuaciones en la parte superior en donde la covarianza S_{xy} describe el comportamiento de los datos en relación a la medida de tendencia central (media) el coeficiente de correlación r es el resultado de dividir el comportamiento general de los datos en relación a la media (covarianza) y dividirlo entre el comportamiento de los datos de cada uno de los datos estadísticos de cada estación con su respectiva media aritmética S_x y S_y de esa forma obtendremos un número adimensional que nos describe el comportamiento de la correlación, valores próximos a 1 ya sean positivos o negativos indican fuertes índices de correlación mientras que valores cercanos a cero nos indican que no existe correlación entre los datos.

$r < 1$ *relación lineal inversa*

$r > 1$ *relación lineal directa*

$r \approx 0$ *variables independientes*

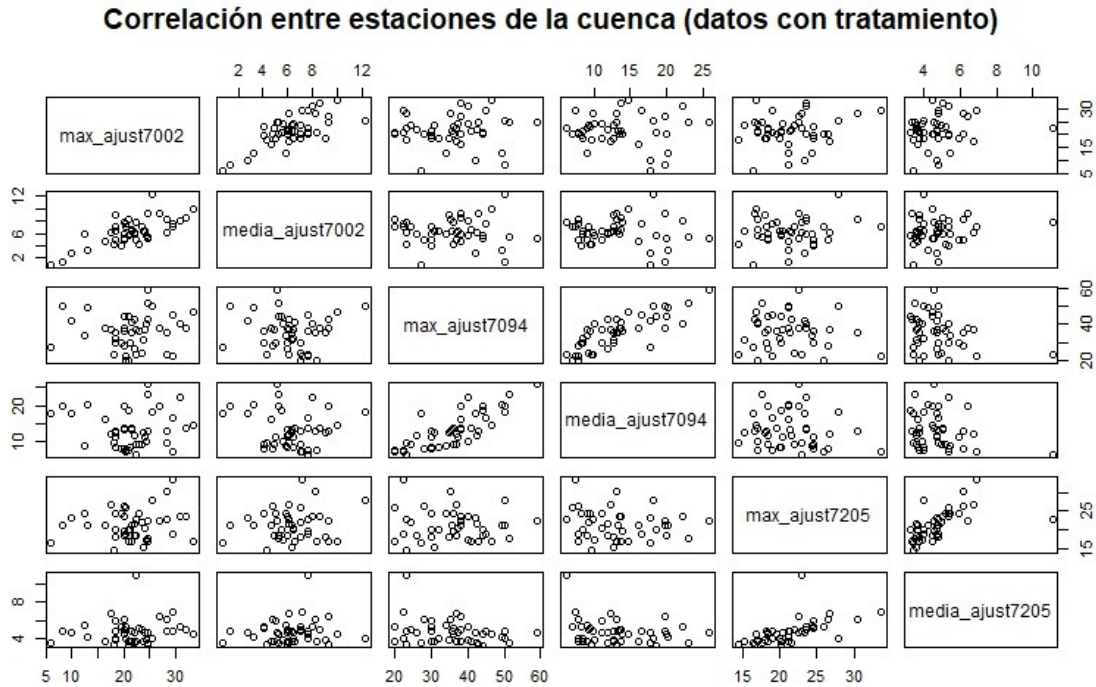
La siguiente tabla nos muestra los resultados del análisis analítico de la correlación, subrayados en color amarillo se observan las correlaciones más significativas de la correlación de datos estadístico de las estaciones sin tratamiento. La mejor correlación de este caso es la dada por la **media 7205** y el **máximo 7205**, $r = 0.52$.

Tabla III.4 Correlación de los eventos de precipitación sin tratamiento.

	maximo7002	media7002	maximo7094	media7094	maximo7205	media7205
maximo7002	1	0.33623948	-0.008144941	0.0596841	-0.10449711	-0.1137475
media7002	0.336239484	1	-0.125416971	-0.08892756	-0.01197656	0.1018778
maximo7094	-0.008144941	-0.12541697	1	0.11960294	-0.04568933	-0.1605565
media7094	0.059684102	-0.08892756	0.119602936	1	0.0656375	-0.2130607
maximo7205	-0.104497112	-0.01197656	-0.045689335	0.0656375	1	0.5181589
media7205	-0.113747455	0.10187784	-0.16055652	-0.21306065	0.51815893	1

Por otra parte se compararon los datos con el tratamiento estadístico descrito previamente, de igual forma como se realizó con los datos anteriores.

Gráficamente se observa una fuerte correlación entre las máximas ajustadas y las medias ajustadas de estas estaciones más precisamente entre las estaciones 7002, 7094, 7205. La grafica siguiente muestra esta observación.



Gráfica III.12 Correlación de eventos de precipitación con tratamiento.

Similar al análisis anterior la forma analítica, se observa en la siguiente tabla los índices de correlaciones y se observa que la mayor correlación de este caso es la dada por la **media_ajust 7094** y el **máx_ajust 7094**, $r = 0.80$

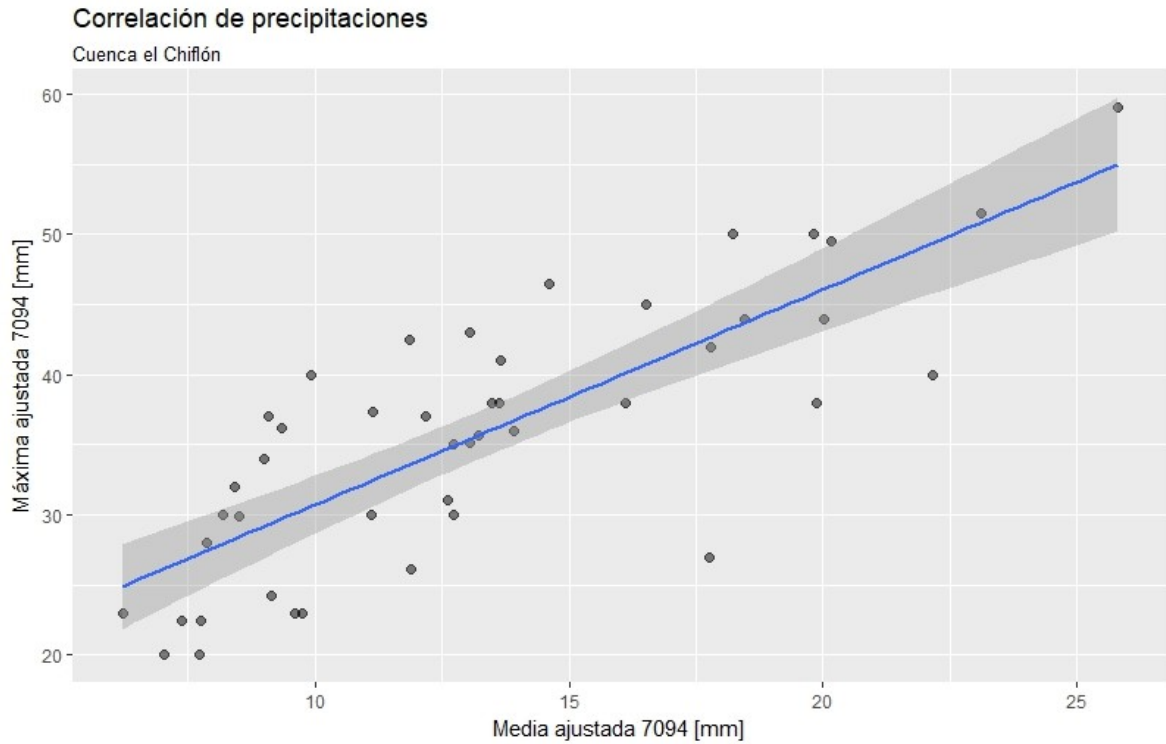
Con esta información podemos elegir la mejor correlación que describa el comportamiento de nuestros datos y de esa forma completar los datos faltantes para este caso el que mejor comportamiento de correlación presenta para completar nuestros datos es la correlación **media_ajust 7094** y el **máx_ajust 7094**, que tiene un factor de correlación $r = 0.80$, por lo tanto esta es la correlación que es de carácter lineal la que usaremos para describir el comportamiento general de los datos y completar los datos faltantes.

Tabla III.5 Correlación de los eventos de precipitación con tratamiento

	max_ajust7002	media_ajust7002	max_ajust7094	media_ajust7094	max_ajust7205	media_ajust7205
max_ajust7002	1	0.70543804	0.06342271	-0.03218691	0.15882687	0.1467437
media_ajust7002	0.70543804	1	-0.02109574	-0.11564033	0.11375537	0.1263261
max_ajust7094	0.06342271	-0.02109574	1	0.79836039	-0.08097683	-0.2781828
media_ajust7094	-0.03218691	-0.11564033	0.79836039	1	-0.12399262	-0.2504635
max_ajust7205	0.15882687	0.11375537	-0.08097683	-0.12399262	1	0.5896453
media_ajust7205	0.14674366	0.12632608	-0.27818276	-0.25046353	0.58964534	1

De esta manera solo nos enfocamos a la correlación que mayor índice $r = 0.80$ cercano a 1. **media_ajust 7094** y el **máx_ajust 7094**, que es la que mejor correlación presenta. A continuación nos enfocaremos en el análisis de ella.

En a la gráfica siguiente observamos esta correlación, y su dispersión de puntos, en color azul se muestra la línea que describe el comportamiento de los datos de forma general, esta línea nos describe la tendencia que representa el comportamiento de la muestra de manera conjunta, esto quiere decir que si logramos deducir la ecuación de esa recta obtendremos los valores en cada punto sobre sobre ella, incluidos acá los valores faltantes, por lo tanto esa es la tarea que sigue, sombreada con una barra de color gris de segmento más grueso sobre la línea azul se muestra el error estándar de esta distribución y describe como se espera que varíen los datos en relación a la línea que describe el comportamiento.



Gráfica III.13 Correlaciones significativas.

Usando el software estadístico R, se analiza esta correlación para encontrar los valores que describen la recta, y su grado de confianza y significación de la muestra, de estos datos dependerá que nuestra ecuación de la recta describa lo mejor posible el comportamiento de todos los datos.

El beneficio del software es que solo se necesita introducir los datos estadísticos y nos devuelve los resultados del análisis, en este caso haremos dos análisis de correlación: correlación lineal y correlación de Pearson y las cuales se analizarán a continuación.

```

Linear correlation

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    -1.57954    1.78191  -0.886    0.38
coor_chif_ct$max_ajust7094  0.41521    0.04832   8.592 8.48e-11 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.987 on 42 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6374,    Adjusted R-squared:  0.6287
F-statistic: 73.82 on 1 and 42 DF,  p-value: 8.484e-11

```

Figura III.7 Correlación lineal por el método de correlación lineal directa.

La figura anterior es una captura de pantalla del software R y en la cual se muestran los resultados del análisis de la correlación lineal que este hizo con nuestros datos, en ella se observan algunos datos interesantes y de nuestro interés. En color amarillo y verde tenemos los interceptos que nos describen la ecuación de la recta y la cual nos servirá para determinar los datos faltantes. En color rojo se observa el **p-valor** y este valor es el grado de significación que tiene nuestro análisis es decir en la estadística descriptiva de entrada se analizan los datos bajo dos premisas o hipótesis; **hipótesis A o hipótesis 0** los datos analizados son independientes y no existe correlación entre ellos, **hipótesis B o hipótesis 1** los datos analizados son dependientes y tienen alto nivel de correlación.

Teniendo estas dos hipótesis el **p-valor** es el grado de significación de nuestro análisis el cual evidencia que una de las hipótesis planteadas es aceptada o no, para cualquiera de los casos el **p-valor** debe cumplir la siguiente condición.

$$p - \text{valor} < 0.05 \quad \text{significación}$$

En este caso el **p-valor** es de 8.48e-11 esto indica que la hipótesis de correlación de los datos es alta, por lo tanto nuestro análisis es significativo, otro punto importante es el valor de **R-squared**

y lo que este valor nos indica es que mientras más cercano este valor se encuentre a 1, mejor correlación entre los datos habrá. Por lo tanto los datos analizados tienen significación y son válidos para nuestro propósito.

```
Pearson's product-moment correlation

data:  coor_chif_ct$media_ajust7094 and coor_chif_ct$max_ajust7094
t = 8.5921, df = 42, p-value = 8.484e-11
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.6572628 0.8853882
sample estimates:
 cor
 0.7983604
```

Figura III.8 Correlación lineal por el método de Pearson.

El siguiente análisis es con el mismo propósito, encontrar el grado de significación de nuestro análisis de correlación, el método es el de correlación de Pearson, este método nos da un **p-valor** al igual que el análisis de correlación lineal es $8.48e-11$, por lo tanto volvemos a comprobar que nuestro análisis es bueno.

Ya evaluado nuestro método de correlación y comprobado que es altamente confiable, en la imagen a continuación se muestra un resumen de los datos que nos servirán para autocompletar nuestros datos así como para validar la significación de nuestro modelo que pretende describir los eventos faltantes.

$$y = -1.57954 + 0.41521x$$
$$p\text{-valor} = 8.48 \text{ e-}11 < 0.05 \text{ (significación)}$$
$$R^2 = 0.6374 \text{ (Bondad de ajuste)}$$

Figura III.9 significación y bondad de ajuste.

$$y = -1.57954 + 0.41521x \quad (\text{III-3})$$

La ecuación mostrada nos representa el modelo que describe el comportamiento de los datos, sin más que agregar el procedimiento es aplicar esta ecuación a todos los datos faltantes para completarlos, esto se hace directamente desde un documento con extensión .csv y el cual podremos modificar desde una hoja de Excel o en nuestro caso desde un bloc de notas.

Los datos tratados, homogenizados y autocompletados ya están listos, lo siguiente es el análisis estadístico de las precipitaciones, de acuerdo con lo visto en la metodología descrita en el capítulo 3, en este punto y para agilizar nuestro proceso de cálculo y hacerlo por cada uno de los métodos propuestos, utilizaremos el software denominado Ax, el cual fue descrito en el capítulo 2, con él haremos el análisis estadístico hidrológico de nuestras precipitaciones a modo que nos devuelva el valor esperado para cierto evento, en este caso precipitaciones para un determinado periodo de retorno.

El software solo es compatible con una versión del sistema operativo Windows vista por lo que se tuvo que emular en una máquina virtual. El primer paso que tuvimos que realizar, después de abrir el software es cargar nuestras bases de datos ya tratadas con los métodos descritos en los párrafos anteriores. La carga de estos datos se realiza de la siguiente manera:

- Los archivos de nuestra base de datos en formatos .csv, los abriremos en un bloc de notas y los guardaremos con una nueva extensión la cual es la que lee el software Ax, esa extensión es .aju de tal modo que nos quedará un archivo por ejemplo: precipitaciones.aju
- Después de tener todas las bases de datos nombrados con nuestra nueva extensión, procederemos a abrir la máquina virtual instalada en nuestra computadora portátil para simular el sistema operativo Windows vista, siendo este nuestro caso.
- Ya en la plataforma de Windows vista procederemos a copiar la carpeta con todas nuestras bases de datos a analizar y que llevan como extensión .aju es recomendable que para no tener rutas de acceso demasiado complejas esta carpeta con las bases de datos sea copiada en el escritorio de la sesión en Windows vista.
- Paso seguido abriremos el software Ax y cargaremos una a una y según las necesidades de nuestro análisis la base de datos de las estaciones de nuestro interés para su correspondiente análisis. Ruta: Archivos/Abrir/Desktop/"carpeta de interés"

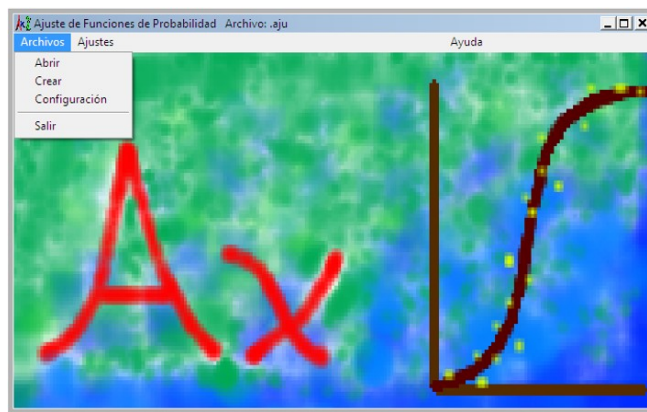


Figura III.10 Pantalla AX.exe para abrir archivos.

- A continuación analizaremos una a una las bases de datos, con cada uno de los métodos de análisis estadístico de nuestro interés, que para nuestro caso serán cinco métodos:

Normal, Log normal, Gumbel, Exponencial y Gamma. Ruta: Ajustes/Ajustar una función/” Normal, Log normal, Gumbel, Exponencial y Gamma”.

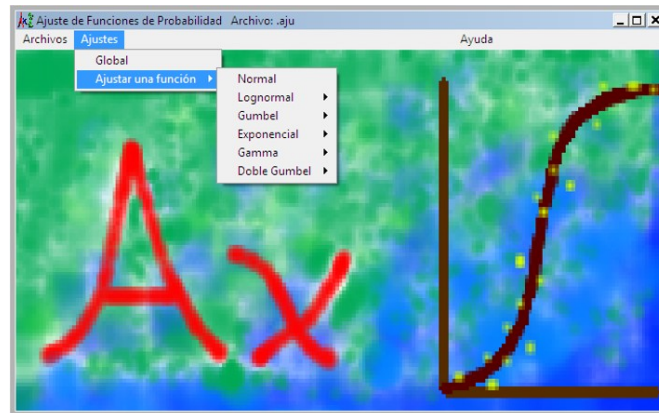


Figura III.11 Pantalla AX.exe ajustes de función.

- Ya seleccionado el método de análisis estadístico el software Ax nos desplegará una ventana en donde se muestran los tiempos de retorno y el error cuadrático, pero el dato más significativo para nuestro propósito es el dato del error estándar, en el análisis posterior se describirá de manera detallada la importancia de este valor. A pesar de esto nuestro verdadero interés de este análisis son los periodos de retorno en que tentativamente nuestras precipitación tienen la mayor probabilidad de suceder, para saber ello al final de esta ventana oprimiremos el botón extrapolar para conocer dichos valores.

i	Tr	Dato	Calculado	Error^2
1	46.	59.	61.99	8.96
2	23.	51.5	56.1	21.17
3	15.33	50.	52.61	6.83
4	11.5	50.	50.11	.01
5	9.2	49.5	48.14	1.84
6	7.67	46.5	46.52	.
7	6.57	45.	45.13	.02
8	5.75	44.	43.9	.01
9	5.11	44.	42.81	1.42
10	4.6	43.	41.82	1.4
11	4.18	42.5	40.91	2.53
12	3.83	42.	40.06	3.74
13	3.54	41.	39.28	2.97
14	3.29	40.	38.54	2.14
15	3.07	40.	37.83	4.69
16	2.88	38.	37.17	.69
17	2.71	38.	36.53	2.17
18	2.56	38.	35.91	4.35
19	2.42	38.	35.32	7.16
20	2.3	37.3	34.75	6.5
21	2.19	37.	34.19	7.87
22	2.09	37.	33.65	11.2
23	2.	36.2	33.12	9.47
24	1.92	36.	32.6	11.54
25	1.84	35.1	32.09	9.05
26	1.77	35.	31.59	11.66
27	1.7	34.	31.09	8.49
28	1.64	32.	30.59	1.99
29	1.59	31.	30.09	.82
30	1.53	30.	29.6	.16
31	1.48	30.	29.1	.8
32	1.44	30.	28.6	1.95
33	1.39	29.9	28.1	3.24
34	1.35	28.	27.59	.17
35	1.31	27.	27.06	.
36	1.28	26.1	26.52	.18
37	1.24	24.2	25.96	3.11
38	1.21	23.	25.38	5.66

Parámetros estadísticos de la muestra:

$\mu = 34.884$ $\sigma = 10.729$ $\gamma = -.509$ $\kappa = 4.49$

Parámetros de la función: Gumbel (momentos)

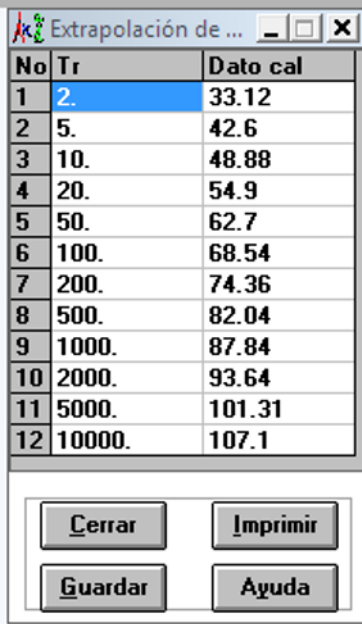
Parámetro	Alfa	Beta
Valor	.1195	30.0566

Error estándar = 3.506

Figura III.12 Errores estándar de precipitación.

- Al oprimir el botón de extrapolar el software Ax abrirá una nueva ventana en donde aparecen los tiempos de retorno que van desde los 2 años hasta los 1000 años y cada tiempo de retorno va acompañado de su correspondiente valor esperado de precipitación.

Estos son los datos con los que trabajaremos. Para ello guardaremos este archivo oprimiendo el botón de guardar, esta acción nos creará un par de archivos en la carpeta donde esta nuestra ruta original de las bases de datos de la precipitación, ambos archivos van acompañados de dos diferentes extensiones .etp y .max posterior a repetimos la operación para todos los métodos restantes, así crearemos un par de archivos de salida con extensiones .etp y .max los cuales nos servirán para nuestro posterior análisis.



No	Tr	Dato cal
1	2.	33.12
2	5.	42.6
3	10.	48.88
4	20.	54.9
5	50.	62.7
6	100.	68.54
7	200.	74.36
8	500.	82.04
9	1000.	87.84
10	2000.	93.64
11	5000.	101.31
12	10000.	107.1

Figura III.13 Tiempos de retorno de precipitación.

Ya con todos los datos analizados para cada uno de los métodos, procedemos a analizarlas, lo primero que hay que hacer es buscar los archivos creados por el software Ax (.etp y .max) estos se encuentran en la misma ruta donde fueron guardados los archivos originales para el tratamiento estadístico para uno de nuestros casos, siguiendo aún desde la sesión virtual de Windows Vista **C:/Users/Juan/Desktop/Tratamiento de datos/El Chiflon/7094** ahí dentro con el archivo

original se encuentran nuestros dos archivos creados por el software Ax, el único que usaremos para nuestro análisis es el archivo .etp.

Para poder tener acceso a la información del archivo, tenemos que dar click derecho en el archivo .etp y seleccionar abrir con, lo haremos como un bloc de notas, esto nos permitirá abrir el archivo y extraer la información. Este paso lo realizaremos con cada uno de los archivos generados por cada uno de los métodos que se trabajaron con el software Ax. Toda la información extraída de ellos, la concentraremos en una tabla la cual será analizada con el software R-studio.

Por lo tanto antes de salir de la sesión virtual de Windows Vista crearemos todas las tablas de cada una de las estaciones representativas de las 6 diferentes zonas de estudio y de ahí las extraemos para trabajarlas en R-studio, todo esto desde una sistema operativo diferente y de uso común para cualquier usuario.

3.5 Interpretación del error estándar.

Hay dos conceptos primordiales para describir nuestras medidas de dispersión uno de ellos es la desviación estándar y otro es el error estándar, nuestro análisis hará énfasis en el error estándar.

$$SE_{\mu x} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{III-4})$$

El error estándar analíticamente es la división de la desviación estándar y la raíz cuadrada de la muestra, esta medida nos indica de qué manera se comportará un evento con respecto a la medida de tendencia central más conocida (media), visto de otra manera el error estándar nos muestra la probabilidad de que un evento ocurra según el comportamiento de los demás, errores estándar más pequeños nos indican que los eventos en conjunto tienen un comportamiento más recurrente y por consecuencia tienen mayor probabilidad de ser descrito por nuestro modelo.

La forma de interpretar el error estándar es siempre compararlo con la media aritmética, ya que este valor nos indicará como se ha mencionado repetidamente cómo se comportará el valor medio con respecto a todos los valores de la muestra y a posibles valores pronosticados de ocurrencia.

La media aritmética más menos el error estándar de la media nos indica que en ese intervalo hay una probabilidad de casi el 68 % de que un evento ocurra.

$$\mu \pm SE_{\mu x} \quad (\text{III—5})$$

Algunas otras formas de tener una expectativa o probabilidad de que un evento ocurra las analizamos con el mismo error estándar de la media incrementando en dos y hasta en 3 veces su valor, al compararlo con la media los intervalos en que un evento se presenten dada cada una de estas igualdades presentan mayores probabilidades que estos ocurran, así la media aritmética comparada con más menos dos veces nos da un intervalo de probabilidad de ocurrencia de un evento hasta del 95%, mientras que para 3 veces la media el intervalo de ocurrencia es a razón del 99%.

$$\mu \pm SE_{\mu x} \quad \rightarrow \quad 68\% \text{ de ocurrencia}$$

$$\mu \pm 2SE_{\mu x} \quad \rightarrow \quad 95\% \text{ de ocurrencia}$$

$$\mu \pm 3SE_{\mu x} \quad \rightarrow \quad 99\% \text{ de ocurrencia}$$

Hay que tener cuidado con este concepto ya que el porcentajes de ocurrencia sean del 68%, 95% y 99% esto dependerá del intervalo, es decir en intervalos pequeños la ocurrencia de un evento según cada caso es mucho más probable que en un intervalo grande, esto se observará en las gráficas siguientes de este análisis.

El gráfico que a continuación se muestra es representativo para destacar como en una distribución gaussiana simétrica se presentan las probabilidades de ocurrencia del error estándar

dependientes de la desviación estándar, al centro la media aritmética y a la izquierda y derecha de ella los porcentajes de ocurrencia del error estándar.

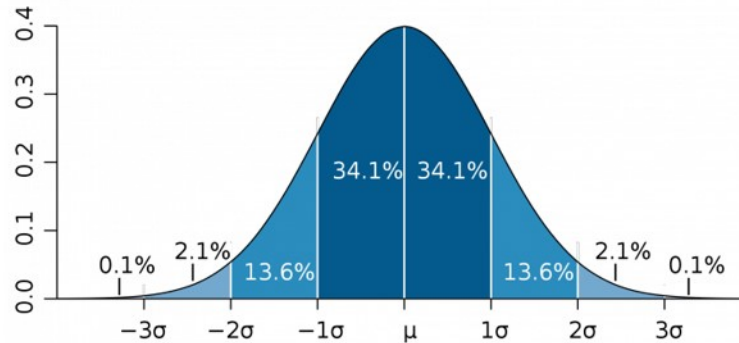


Figura III.14 Distribución de los errores estándar.

La siguiente figura es para contextualizar las siguientes gráficas, ya con el concepto del error estándar esta figura representa un punto esperado de precipitación en la gráfica de periodos de retorno, las barras que están por debajo y por arriba del punto nos indican los diferentes intervalos para cada comparativo de los errores estándar, esto nos dará una mejor comprensión de como se espera que se presente el valor medio, dentro de los posibles intervalos definidos por los errores estándar.

Es lógico pensar que como se dijo en los párrafos anteriores el porcentaje de probabilidad de que un sucesos ocurra dado el cálculo del error estándar estará dado por qué tan grande es este error, recapitulando lo dicho *“errores estándar pequeños nos darán una mejor representatividad de los eventos esperados, mientras que por el contrario errores estándar grandes nos darán una rango muy grande de que un evento ocurra”*.

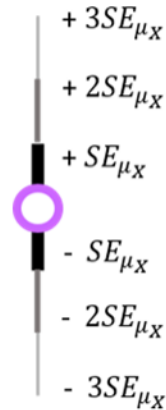


Figura III.15 Errores estándar y sus intervalos.

3.6 El cálculo de los tiempos de retorno.

Las siguientes formulas son usadas para los cálculos del caudal y sus tiempos de retorno de ahí la importancia de ellas y a continuación se describen:

Tiempo de concentración, en horas (t_c):

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} = 2.46 \text{ horas} \quad (\text{III-6})$$

Tiempo de retraso, en horas (t_r):

$$t_r = 0.6t_c = 1.48 \text{ horas} \quad (\text{III-7})$$

Duración en exceso, en horas (d_e) para cuencas pequeñas:

$$d_e = t_c = 2.46 \text{ horas} \quad (\text{III-8})$$

Tiempo de pico en horas (t_p):

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r = 2.71 \text{ horas} \quad (\text{III-9})$$

Tiempo base en horas (tb):

$$t_b = 2.67t_p = 7.23 \text{ horas} \quad (\text{III-10})$$

Caudal pico unitario, en m³/s/mm (qp):

$$q_p = \frac{0.55A}{t_b} = 4.96 \text{ horas} \quad (\text{III-11})$$

- Precipitación en exceso o efectiva (P_e):

$$P_e = \frac{\left[P_i - \frac{508}{N} + 5.08 \right]^2}{P_i + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad (\text{III-12})$$

En donde:

P_i = Precipitación en cm de cada periodo de retorno obtenido del análisis con el software Ax.

N =Valor dado por las características de la cuenca según tabla USCS.

- Coeficiente de escurrimiento adimensional:

$$C_e = \frac{P_e A_c}{P_i A_c} \quad (\text{III-13})$$

En donde:

P_e = Precipitación efectiva en mm para cada periodo de retorno obtenido del análisis con el software Ax.

P_i = Precipitación en cm de cada periodo de retorno obtenido del análisis con el software Ax.

A_c = Área de la cuenca en km^2 .

- Cálculo del Caudal para cada tiempo de retorno (Q_p)

$$Q_p = q_p P_e \quad (\text{III-14})$$

En donde:

P_e = Precipitación efectiva en mm para cada periodo de retorno obtenido del análisis con el software Ax.

q_p = gasto pico.

3.7 Fórmula para el cálculo de la Potencia en corrientes hidráulicas.

$$P = \rho g Q H \eta \quad (\text{III—15})$$

En donde:

P = es el potencial de generación eléctrica que puede proporcionar el caudal.

ρ = es la densidad del fluido en este caso agua (1000 kg/m³).

g = es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).

Q = es caudal obtenido por nuestro método en este caso (3.03 m³/s).

H = es el salto hidráulico o desnivel de alturas, en este caso es de (62 m).

η = es una eficiencia propuesta que dependerá del tipo de turbina a usar en este caso 1.

Por lo tanto el potencial para la generación que puede obtenerse del caudal calculado y este es el dato final que buscamos y que nos importa para los propósitos de esta investigación.

Capítulo [IV] Resultados

4.1 Análisis de los resultados de los métodos estadísticos hidrológicos.

El análisis que a continuación se realiza está argumentado sobre la zona de estudio que desde el inicio de este capítulo se viene trabajando y basado en la estación meteorológica más representativa de esta, es la estación 7094 La mesilla la cual se encuentra dentro de la cuenca de análisis, esto se hizo con cada una de las zonas de estudio, esta se eligió debido a que ya existe un trabajo previo que se dedicó a un estudio en campo de esta.

La mayoría de los gráficos de acá en adelante muestran la evolución de la precipitación esperada a través de periodos de retorno de tiempo, a modo de repaso de lo tratado en el capítulo III en donde se describió el periodo de retorno, recordaremos que el periodo de retorno de un evento esperado no es más que un periodo probabilístico de que un suceso pueda ocurrir y no es que el suceso ocurra exactamente en el periodo de retorno indicado.

Analizaremos nuestras cuatro clases de muestras (máximas sin tratamiento, máximas con tratamiento, medias sin tratamiento y medias con tratamiento) y compararemos cada una de estas clases con cada método estadístico hidrológico analizado.

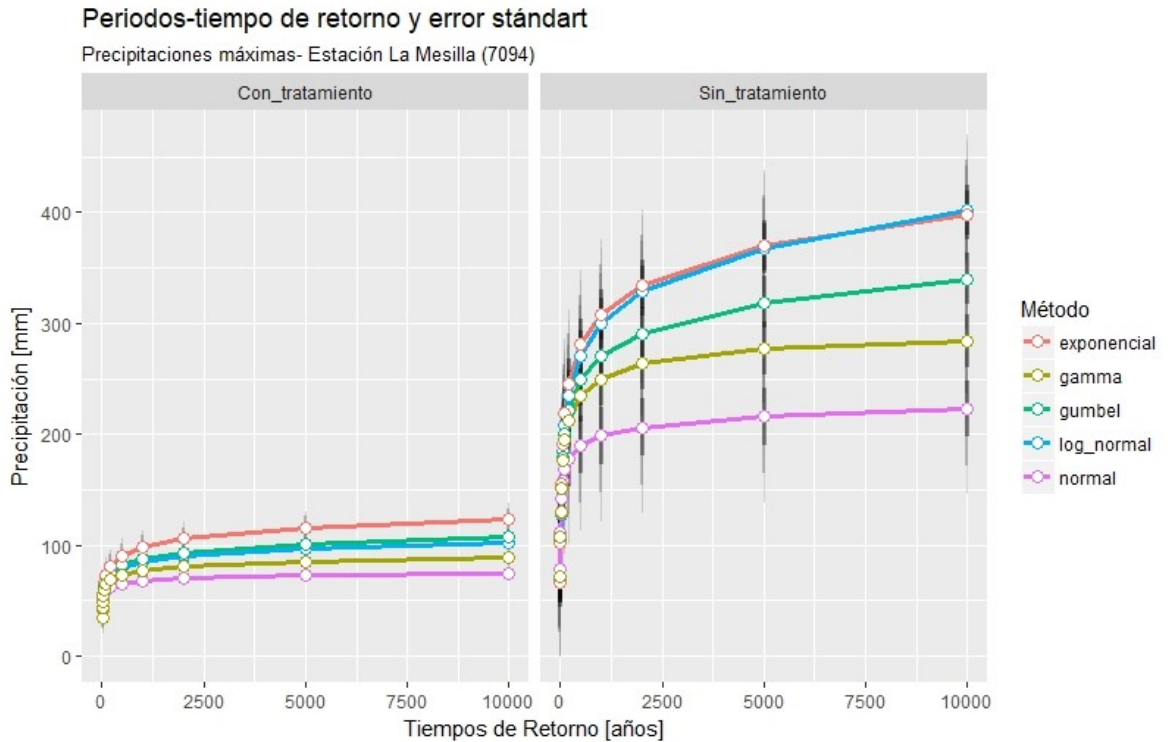
Para poner en contexto los gráficos que a continuación se presentan es preciso hablar de un concepto estadístico relacionado con las medidas de dispersión estadística. Si las medidas de tendencia central, si hablamos de estadística, son muy importantes ya que ellas describen el comportamiento esperado promedio de un evento, las medidas de dispersión juegan un papel aún más importante, ya que a partir de ellas se puede conocer cómo se comportan todos los datos a razón de las medidas centrales, es decir; su cálculo nos describe como todo el conjunto de datos se

comportara en relación a la media y eso es de carácter primordial ya que de ello depende el factor de ocurrencia de un evento debido al comportamiento total de la muestra.

En el siguiente grafico analizaremos los tiempos de retorno de la estación 7094 “la mesilla” perteneciente a nuestra microcuenca denominada “el chiflón”, el análisis se realizara en dos gráficas, la primera contiene el análisis estadístico hidrológico de las precipitaciones y los tiempos de retorno de las precipitaciones de las clases máximas con tratamiento y sin tratamiento de nuestro estudio y en la segunda gráfica se describirán las clases medias de igual manera tanto con tratamiento como sin tratamiento.

En esta primer grafica observamos el comportamiento de las precipitaciones máximas en milímetros comparadas contra los periodos de retorno de ocurrencia de las mismas en ambos casos con tratamiento y sin tratamiento, a la izquierda una y a la derecha otra respectivamente. Se observa un comportamiento de crecimiento exponencial en ambas, con la diferencia de que en la gráfica de la izquierda, sin tratamiento los valores de precipitación con respecto al periodo de retorno son pequeños y se describen en un intervalo de entre 20 milímetros y 120 milímetros. Por otra parte del lado derecho se observa como las precipitaciones contra el tiempo de retorno de la clase máxima sin tratamiento, tienen valores que oscilan entre 60 milímetros y los 400 milímetros.

Otro punto a destacarse acá es el de los intervalos de los errores estándar en el grafico correspondiente a los análisis con tratamiento son apenas perceptibles, mientras que en los datos con tratamiento son muy marcados, esto muestra una clara dispersión de todos los eventos analizados, en el análisis sin tratamiento dando poca probabilidad de ocurrencia del evento ya que la muestra contiene datos muy dispersos.



Gráfica IV.1 Tiempos de retorno de la precipitación de los valores máximos.

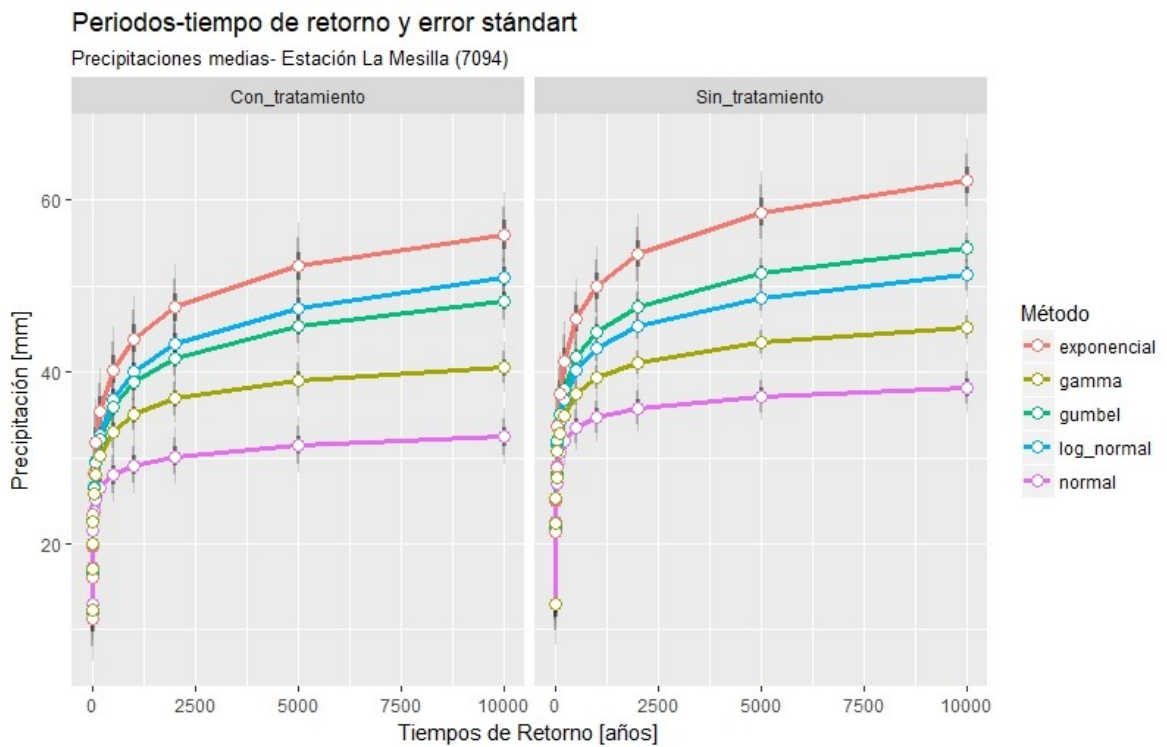
Ahora observamos los valores de las precipitaciones medias tanto de los valores con tratamiento y sin tratamiento, lo que se observa en la gráfica siguiente es que las precipitaciones descritas por ambos métodos es que estos valores describen comportamientos bastante similares a lo largo de los periodos de retorno analizados, estos valores están en un rango de entre los 5 milímetros y los 60 milímetros.

Al igual que la gráfica anterior en esta se muestran los errores estándar los cuales son un más pequeños en sus intervalos, lo cual hace que su recorrido de confiabilidad y posibilidad de ocurrencia este bastante acentuada. En la siguiente tabla se muestran numéricamente los errores estándar de los análisis de precipitación hechos en el software Ax, y se observa como en cada uno de los métodos con las diferentes clases de datos (con tratamiento y sin tratamiento) hay hasta una variación de

casi 20 órdenes de magnitud uno del otro, haciendo evidente que el tratamiento estadístico realizado en este trabajo es de importancia.

Tabla IV.1 Distribución de los intervalos del error estándar.

	Con_tratamiento			Sin_tratamiento		
	SE_{μ_X}	$2SE_{\mu_X}$	$3SE_{\mu_X}$	SE_{μ_X}	$2SE_{\mu_X}$	$3SE_{\mu_X}$
○ exponencial	5.03	10.06	15.08	22.31	44.62	66.94
○ gamma	2.99	5.99	8.98	23.92	47.84	71.76
○ gumbel	3.51	7.01	10.52	22.89	45.78	68.66
○ log-normal	3.35	6.69	10.04	22.44	44.89	67.33
○ normal	2.34	4.68	7.02	25.80	51.61	77.41



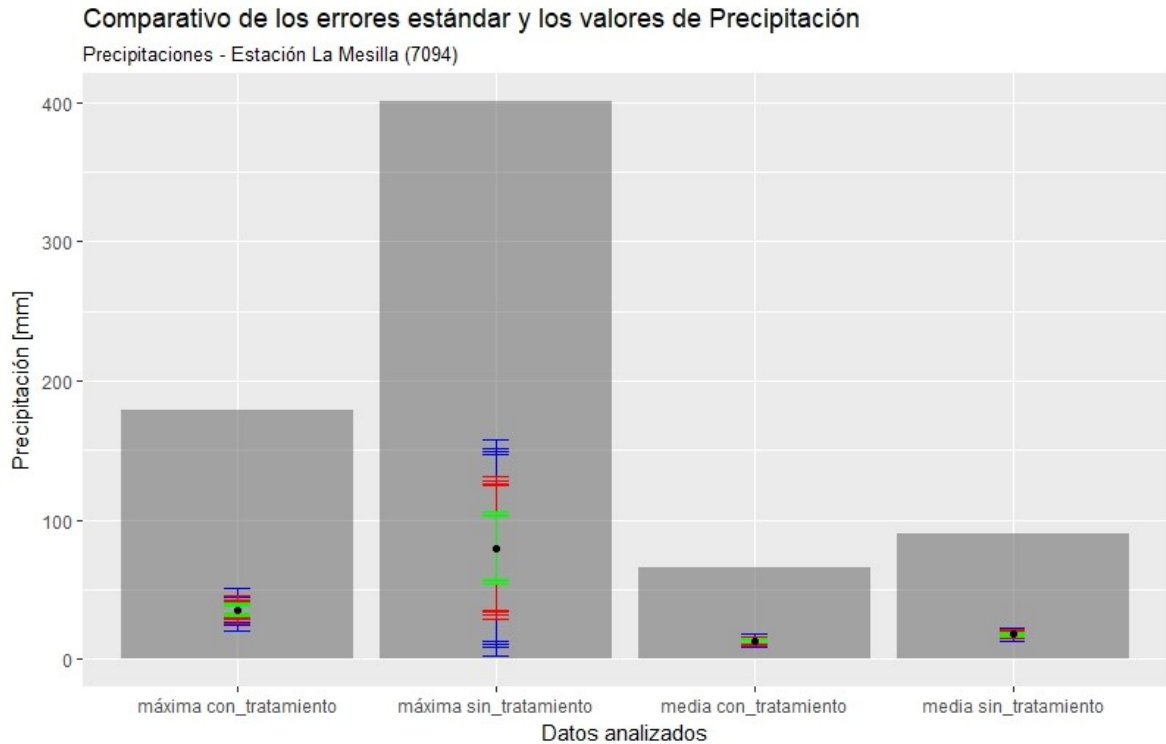
Gráfica IV.2 tiempos de retorno de las precipitaciones de los valores medios.

Para hacer aún más contundente el hecho que se viene recalcando, sobre la importancia del tratamiento estadístico de los datos previos al análisis, la siguiente gráfica muestra como los errores estándar se presentan a través de sus intervalos de recurrencia en toda la muestra, vemos en la gráfica como las barras de color gris nos muestran todo el espacio muestral de cada una de nuestras clases, el punto negro indica la media aritmética de la muestra, las barras con tope indican los errores estándar de cada muestra respectivamente en verde, rojo y azul, se muestran los errores estándar SE, 2SE Y 3SE.

Poniendo atención a la gráfica en la representación de la muestra de precipitación máxima sin tratamiento, se observa como los intervalos de los errores estándar de la muestra abarcan casi la mitad de ella dejando una probabilidad de ocurrencia del suceso demasiado holgada, es lógico pensar que esta muestra está muy dispersa y no es representativa al momento de esperar un evento posible de ocurrencia, en resumen esta muestra no es representativa para los propósitos que buscamos.

Por otro lado observan como las muestras con tratamiento tienen mejor respuesta a los intervalos de los errores estándar ya que tanto en los valores máximos como en los valores medios los intervalos son muy pequeños y existe mayor representatividad de los datos y es más probable que un evento esperado ocurra según lo estimado debido a ese hecho.

No hay que dejar de observar la muestra de valor medio sin tratamiento, esta presenta como se observa en la gráfica intervalos muy pequeños en sus errores estándar, eso a primera vista puede ser muy bueno ya que existe muy buena representatividad de los datos de la muestra, sin embargo, como también se hace notar en la gráfica la muestra es tan recortada que muchos datos que pueden ser relevantes a todos los eventos que son representativos en la muestra son eliminados.



Gráfica IV.3 Fluctuación de los errores estándar en la muestra general.

Es con el anterior análisis que ahora definimos que muestras manipular para nuestros objetivos. Como anteriormente se mencionó en este capítulo nuestro objetivo principal es encontrar primeramente el potencial hidrológico para la generación eléctrica y como objetivo complementario encontrar el caudal máximo extraordinario para efectos de los proyectos de infraestructura de nuestra micro-central eléctrica. Para ambos casos necesitamos obtener los caudales un caudal en pocas de estiaje (sin lluvia) y otro caudal máximo extraordinario que generalmente se presentan en temporadas de lluvia.

Esta selección de las muestras de precipitaciones para encontrar nuestros caudales la realizamos bajo los siguientes criterios:

- **Para el cálculo de las avenidas máximas:** Indiscutiblemente para la obtención de este caudal utilizaremos la muestra sin tratamiento en donde solo se encuentran las precipitaciones máximas registradas en las estaciones meteorológicas. Esta muestra está completa y cabe decir que no se le realizó ningún tratamiento.
- **Para el cálculo del potencial hidrológico:** Para este caso el criterio de selección debe ser un poco más cauteloso. De inicio nos interesa que los errores estándar de la muestra no sean muy grandes, ya que esto nos garantiza que la probabilidad de ocurrencia de un evento se apegue más a lo estimado en este método, otro criterio es que la muestra en general sea lo más representativa de la muestra original tomada por la estación meteorológica y proporcionada por CONAGUA. En resumen los dos criterios son: 1) bajo error estándar 2) buena representatividad de la muestra en general.

Por lo tanto para ambos casos mencionados en el párrafo anterior usaremos las **clases máximas sin tratamiento y máximas con tratamiento**.

4.2 Relación Precipitación – Caudal.

Debido a que comúnmente no se cuentan con registros adecuados para la determinación del caudal en un sitio de interés determinado para diseñar nuestro proyecto, se recurre comúnmente a estimar este caudal a través de parámetros que son conocidos y que están relacionados con este, en este caso hablamos de los registros de precipitaciones.

En general, los registros de precipitaciones son más abundantes que el de los caudales y además no se afectan por cambios en la cuenca por efecto de obras de almacenamiento, derivación, talas, urbanización, etc. Por ello es conveniente contar con métodos que permitan determinar los caudales una cuenca mediante las características de la misma precipitación.

Hasta este punto las características de la cuenca son ya conocidas a través de los métodos descritos en los párrafos anteriores y dado que ya tenemos nuestros datos de precipitación

analizados, nos es más fácil obtener este dato. Con lo descrito en el capítulo III se puntualizó que la complejidad de los métodos para relacionar las precipitaciones con los caudales depende de cuantos parámetros incorporemos a nuestro análisis, precisando esto nos introduciremos directamente a los resultados obtenidos a partir de la metodología descrita haciendo uso del método de la fórmula racional y uso del hidrograma sintético.

Siendo nuestro caso de estudio el tomado desde el inicio de este capítulo tenemos los siguientes datos para nuestro cálculo los cuales se realizan con las formulas visto en el tema del capítulo III Caudales y tiempos de retorno:

Tabla IV.2 Valores geomorfológicos para la estimación del caudal.

Micro-cuenca El chiflón Comitán de Domínguez, Chiapas

Área de la cuenca en Km ² (Ac)	65.22
Longitud del Cauce Principal en m (L)	17073.56
Pendiente del cauce principal en m (S)	0.0245

4.3 Hidrograma base (forma del hidrograma).

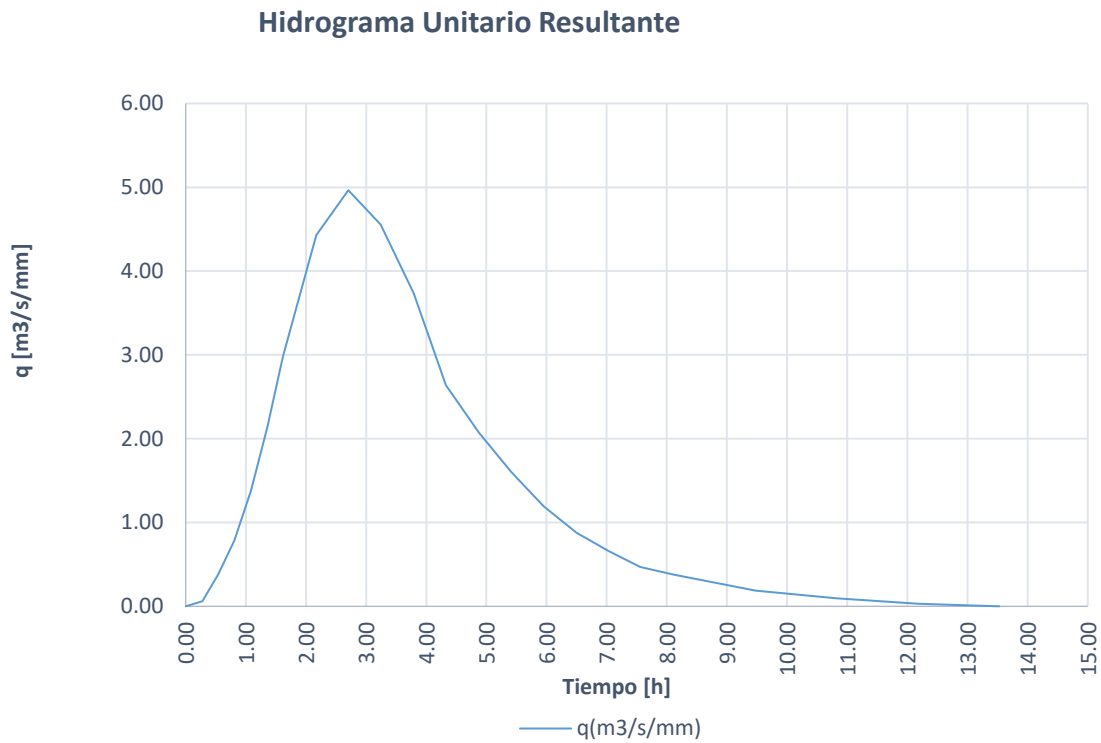
La siguiente tabla básicamente es una forma básica del hidrograma esperado, a partir de ella construimos el hidrograma unitario, esta tabla representa gráficamente una distribución gaussiana bastante simétrica en donde en el eje de las x tendremos al tiempo en horas y en el eje de las y tendremos a los caudales hasta un máximo de 1 m³/s/mm de ahí proviene el nombre de diagrama unitario. Cabe hacer notar que esta distribución solo tiene una condicione importante y es que el caudal máximo de la distribución gaussiana no sobrepase la unidad y puede ser acomodada según la experiencia del proyectista.

Tabla IV.3 Hidrograma sintético unitario.

Adimensional	
Tiempo (h)	q(m³/s/mm)
0	0
0.10	0.01
0.20	0.08
0.30	0.16
0.40	0.28
0.50	0.43
0.60	0.60
0.80	0.89
1.00	1.00
1.20	0.92
1.40	0.75
1.60	0.53
1.80	0.42
2.00	0.32
2.20	0.24
2.40	0.18
2.60	0.13
2.79	0.09
3.00	0.08
3.50	0.04
4.00	0.02
4.50	0.01
5.00	0.00

Con esta tabla para la construcción del hidrograma base y los datos previamente calculados crearemos el hidrograma unitario correspondiente a nuestro caso. La construcción de este hidrograma se realizará multiplicando cada uno de los tiempos de la tabla del hidrograma adimensional por el valor del tiempo pico (t_p) calculado con la información geomorfológica y por consiguiente el gasto

unitario será calculado con la columna del gasto unitario del hidrograma adimensional y multiplicándola por el gasto pico (q_p), resultando en el diagrama unitario siguiente.



Gráfica IV.4 Hidrograma unitario resultante.

La figura del hidrograma unitario se define como el hidrograma de escurrimiento directo que se produce por una lluvia efectiva o en exceso de lámina unitaria (1mm) y que se reparte uniformemente en la cuenca.

Como se mencionó en el capítulo anterior recordaremos que suponiendo que se presenta una misma tormenta en dos cuencas con el mismo suelo y la misma área, pero de diferente forma; aunque

el volumen escurrido sea el mismo, el gasto pico y de las demás características del hidrograma varían de una cuenca a otra. Así que en resumen podremos decir que esta es la forma en que se comportará nuestro evento estimado en la cuenca.

4.4 Coeficiente de escurrimiento por el método de los números de escurrimiento.

En la tabla mostrada en el anexo B de este trabajo se muestran los valores de N para algunas condiciones que dependen del tipo de suelo, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno y la precipitación antecedente entre otros factores.

Este método principalmente está regido por la USCS (Unified Soil Classification System) y su norma FM 5-410 y la cual asigna un valor determinado de N según el tipo de suelo y el uso del mismo tomando en cuenta también la pendiente media del mismo, a partir de esta tabla iniciaremos con el cálculo de nuestros caudales.

- Características de la cuenca según tabla USCS.

Tabla IV.4 Valor N para la cuenca según USCS

USO DE SUELO	PENDIENTE	TIPO DE SUELO
Bosque	>1%	C

Valor de N = 75

A partir de las siguientes relaciones, y los datos previamente obtenidos, así como de nuestras precipitaciones calculadas con el software Ax con periodos de retorno ya establecidos construiremos nuestros gráficos de caudales y periodos de retorno.

Con estas ecuaciones se construye la siguiente tabla que nos dará la información de los caudales para las clases seleccionadas y para cada método del cual se calculó la precipitación a través del software Ax.

La siguiente tabla solo muestra el cálculo de los caudales a lo largo de tiempos de retorno que van desde los 2 años hasta los 1000 años obtenidos por las formulas del método del software Ax (descritos en el capítulo III relacionado a los Caudales y los tiempos de retorno), pero solo para uno de los métodos estadísticos hidrológicos siendo este el caso el método normal, cabe mencionar que esto se realizó para todos y cada uno de los 5 métodos, y todos estos se muestran concentrados y sintetizados en las tablas siguientes.

Tabla IV.5 Tabla de cálculo del caudal según precipitación.

Tr (años)	P (cm)	Pe (mm)	Ce (adim)	Q (m³/s)
2	1.74	0.00	0.00	0.01
5	2.19	0.28	0.01	1.39
10	2.43	0.59	0.02	2.94
20	2.63	0.93	0.04	4.60
50	2.85	1.38	0.05	6.86
100	2.99	1.73	0.06	8.59
200	3.13	2.08	0.07	10.31
500	3.29	2.53	0.08	12.57
1000	3.40	2.87	0.08	14.26
2000	3.51	3.21	0.09	15.94
5000	3.64	3.65	0.10	18.14
10000	3.74	3.99	0.11	19.79

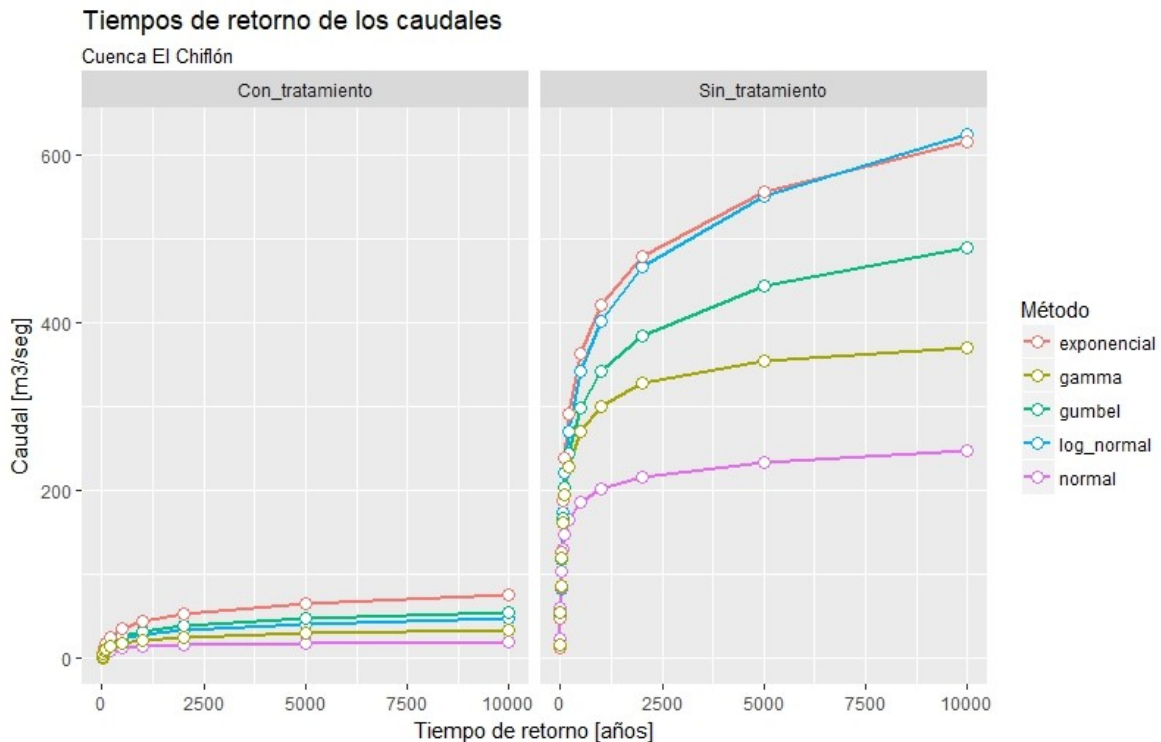
La gráfica siguiente nos muestra en conjunto los caudales obtenidos a partir de todos los métodos estadísticos hidrológicos que se usaron para analizar este caso y que como se vio fueron determinados a partir de la método de la formula racional y los diagramas unitarios, como ya se mencionó en párrafos anteriores las clases bajo análisis son las precipitaciones máximas, con y sin tratamiento ya que estas cumplen con los objetivos buscados por esta metodología y los cuales son:

- Obtención del caudal para la elección de la turbina para la generación.
- Obtención del caudal máximo extraordinario para el diseño de la infraestructura.

A la izquierda tenemos la gráfica de los caudales máximos con tratamiento y a la derecha la gráfica de los caudales máximos sin tratamiento. En ambas se muestran los comportamientos de los caudales a través de periodos de retorno que van desde los 2 años hasta los 1000 años.

Lo primero que se observa en ambas graficas es los diferentes comportamientos de los caudales la gráfica de la derecha que representa a los caudales obtenidos a partir de las precipitaciones máximas con tratamiento tienen menor alcance llegando a valores máximos cercanos a 80 m³/s mientras que los caudales obtenidos de los datos sin tratamiento llegan a valores máximos que se comportan en un intervalo de entre 250 m³/s a 600 m³/s.

Esto en gran parte se debe al hecho del tratamiento de datos y a la eliminación de los datos discordantes (outliers) dejándonos muestras más representativas y con mejor descripción general del comportamiento de los eventos. Por lo tanto acá se hace evidente que la muestra con tratamiento nos servirá para elegir el caudal que usaremos la selección de la turbina de generación; mientras que de los caudales obtenidos a partir de la muestra sin tratamiento servirán para diseñar la infraestructura.



Gráfica IV.5 Caudales para los diferentes tiempos de retorno.

4.5 Criterio de selección de los caudales para los objetivos buscados.

Necesitamos tener dos caudales para cumplir con el objetivo de tener un proyecto funcional de electrificación, estos dos caudales como se ha ido mencionando servirán para la correcta elección de la maquinaria para la generación y el otro tendrá repercusión en el diseño de la infraestructura desde donde se gestionara el proyecto que se pueda tener en mente.

Es preciso recalcar que **el objetivo general de esta metodología es solamente determinar el potencial hidráulico para la generación eléctrica**, sin embargo es importante no soslayar el hecho de que un proyecto funcional de micro generación eléctrica no solamente depende de las cantidades de kilowatts o mega watts que se pueda generar a través de la energía hidráulica, sino también de otros factores como la infraestructura, entre otros, es por eso que en este apartado del capítulo IV creemos necesario recalcar el hecho de que el caudal de diseño para la infraestructura es importante.

Por lo tanto tenemos que elegir dos caudales, uno para la generación y otro para la proyección de la infraestructura. ¿Cómo se eligen estos caudales a partir de un gráfico de caudales contra periodos de retorno?

- Selección del caudal para la proyección de la infraestructura (caudal máximo extraordinario)

Para tener una mejor noción del comportamiento de los caudales calculados recortaremos nuestras graficas en el eje de los periodos de retorno ya que no utilizaremos periodos de retorno muy grandes, el intervalo útil para esta será desde 0 hasta 200 años.

La importancia de la selección de los caudales recae principalmente en los tiempos de retorno, recordemos lo descrito en el capítulo III sobre este concepto. “El periodo de retorno es un concepto

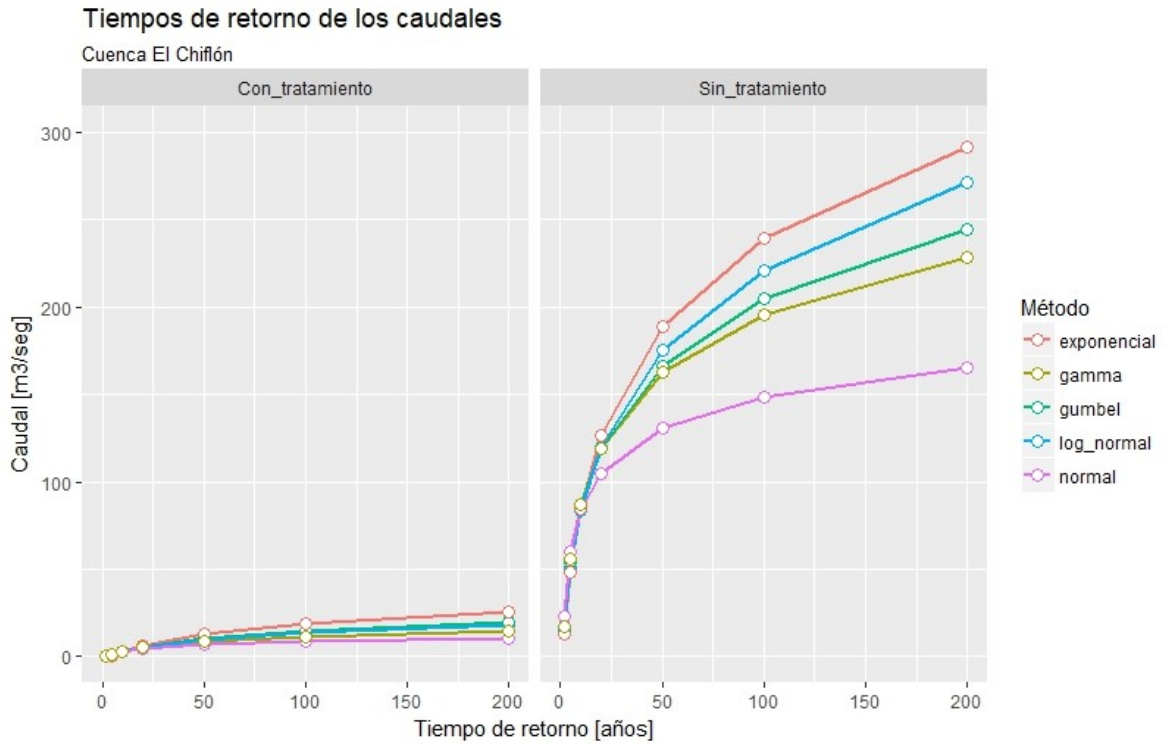
muy engañoso, aún para los entendidos en estos temas probabilísticos, el periodo de retorno es un “tiempo medio” asociado a una probabilidad, ambos conceptos se confunden”. El periodo de retorno es el valor promedio de la aleatoriedad de que un evento de un valor estimado ocurra para cierta cantidad de años estimada.

Pues bien para este caso ya existen convenciones o normas que nos indican que criterios son los mejores para la correcta selección del caudal, uno de ellos y en el cual nos guiaremos es un documento de SAGARPA denominado MANUAL DE HIDROLOGÍA APLICADA A PEQUEÑAS OBRAS HIDRÁULICAS [29] y la cual precisa lo siguiente:

Tabla IV.6 Selección del periodo de retorno según la infraestructura.

Categoría de la obra	Período de retorno(años) para la avenida de diseño del vertedor
<ul style="list-style-type: none"> • Categoría (A): Embalses situados en zonas totalmente deshabilitadas, o bien, inmediatamente aguas arriba de otro embalse de mucha mayor capacidad o de la desembocadura del río en el mar. En este caso, la ruptura de la presa no tendría más trascendencia que las pérdidas económicas propias de ella y no podrían producirse daños a terceros. 	50
<ul style="list-style-type: none"> • Categoría (B): Embalses situados aguas arriba de núcleos de población. Pero por su capacidad reducida u otras circunstancias, aunque se rompiese la presa por una avenida importante, las víctimas y daños serían los mismos que si no hubiese existido el embalse. 	75
<ul style="list-style-type: none"> • Categoría (C): Embalses situados aguas arriba de núcleos de población y cuyas características de capacidades, etc., determinan que si se presenta una gran avenida y ésta produce la falla de la presa, la onda de avenida debida al vaciado del embalse incrementa sensiblemente las víctimas y daños que ocasionaría por si sola la avenida del río. 	100

Vemos que el criterio es basado sobre el factor de riesgo y debido a que eventos máximos, en este caso caudales suceden con menor recurrencia y con mayor periodo de retorno, por lo tanto la selección del periodo de retorno que usaremos para este caso será el de 100 años.



Gráfica IV.6 Selección del periodo de retorno según la infraestructura.

Tabla IV.7 Valores de los caudales según tiempo de retorno.

Periodo de retorno 100 años	
Método	Caudal [m³/s]
Normal	148.40
Log – normal	220.86
Gumbel	204.53
Exponencial	238.78
Gamma	195.11
Promedio	201.54

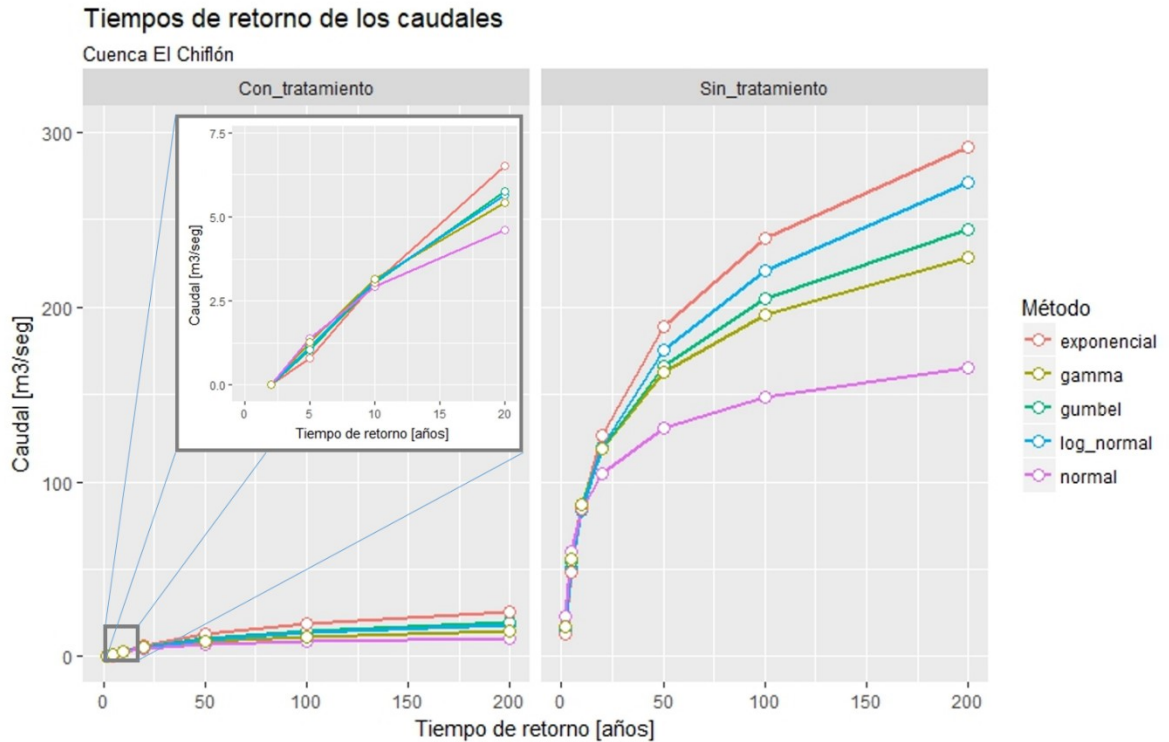
El método comúnmente usado para la obtención de los caudales de diseño, por diversas razones y debido a su simplicidad es el método de Gumbel el cual en este caso es de 204.53 m³/s. En

este punto es donde el criterio del diseñador debe entrar en juego para definir a partir de esta base, cual es caudal de diseño que usará, para nuestro caso y siendo esta metodología que pretende llegar a un punto de ser aplicable a muchos casos de estudio siempre se seleccionará el caudal más grande sin importar el método, que para todo fin práctico es de **220.86 m³/s**.

4.5.1 Criterio de selección de los caudales la generación eléctrica (potencial hidrológico).

Para este caso no existe documento o reglamentación la cual nos indique un criterio definido y ya estudiado para la selección del caudal a partir de un periodo de retorno. No hay un criterio como tal ya que la determinación de este caudal se realiza de manera directa en campo, a través de un aforo. En la selección de este criterio se tendrá que recurrir al concepto de periodo de retorno teniendo en cuenta cuales son los caudales más recurrentes o comunes en nuestra zona de estudio, es decir caudales se presentan normalmente a lo largo del año.

En el caso anterior se observó que por un factor de seguridad se usaban periodos de retorno grandes del orden de 100 años dado su poca recurrencia del evento esperado. En este caso por lo contrario usaremos periodos de retorno más pequeños porque lo que acá se espera es que el evento sea el que más comúnmente ocurre que ocurre con menor periodo de retorno, es decir que son más frecuentes.



Gráfica IV.7 Selección de caudales para el potencial hidráulico.

Tentativamente usaremos dos periodos de retorno para el análisis de nuestro caudal más pequeño y con mayor significado en cuanto a lo relacionado con al caudal promedio se refiere, estos periodos de retorno son los periodos de 10 años y 20 años, se eligieron estos caudales que no son muy pequeños como los relacionados con los tiempos de retorno de 2 y 5 años que fluctúan entre los 0.2 m³/s y los 1.50 m³/s y tienen mejor representatividad con el caudal calculado directamente por el método de aforos registrado en el trabajo, Determinación del potencial de energía hidráulica para la generación de electricidad en el río San Vicente [30] y el cual se analizara al final de este capítulo.

Tabla IV.8 Valores de caudales según tiempo de retorno de 10 y 20 años.

Periodo de retorno 10 años		Periodo de retorno 20 años	
Método	Caudal [m ³ /s]	Método	Caudal [m ³ /s]
Normal	2.93	Normal	4.59
Log – normal	3.06	Log – normal	5.65
Gumbel	3.03	Gumbel	5.77
Exponencial	3.02	Exponencial	6.51
Gamma	3.14	Gamma	5.41
Promedio	3.04	Promedio	5.59

La elección correcta del caudal es primordial ya que de ello dependerá la selección de la turbina para la generación, en estos dos periodos de retorno se presentan gastos que varían de entre los 3.0 m³/s y los 5.5 m³/s, ya que necesitamos que la ocurrencia de nuestro evento sea la más representativa en cualquier época del año usaremos el periodo de retorno más corto de los que tenemos en la tabla, siendo este el de 10 años y para seleccionar el caudal usaremos el método de Gumbel el cual es de **3.03 m³/s**.

Tenemos a este punto seleccionados ya los dos caudales que nos servirán para nuestro propósito y los cuales compararemos con los estudios realizados en la misma zona que se reflejan en la tesis ya mencionada [30].

Tabla IV.9 Caudal para la determinación del potencial hidráulico.

Caudal para selección de turbina	Caudal máximo de diseño para infraestructura
3.03 m ³ /s	220.86 m ³ /s

Por lo tanto y de esa manera podremos calcular ya ahora el potencial hidráulico para la generación eléctrica a partir de la ecuación (III - 15) en el capítulo III:

$$P = 2.26 \text{ MW (estimados para la generación eléctrica).}$$

Este resultado representa el potencial para la generación eléctrica que posee el río en una situación muy particular, que está restringida a las condiciones tomadas por el caso de estudio realizado por Fenton Peñalver [30] en donde se toma solo una porción de agua del río, se desvía y se encauza hacia un cuarto de máquinas que se encuentra a 62 m de altura por debajo de la toma, esto por motivos exclusivamente de poder comparar el método indirecto con el directo, esto implica que el potencial queda en dependencia del desnivel de la toma al del cuarto de máquinas (salto hidráulico) y de diversas condiciones en donde los mapas que se obtuvieron de la zona nos ayudaran a la planeación.

4.6 Comparación de Resultados.

En el trabajo de tesis de Reinier Fenton Peñalver “**Determinación del potencial de energía hidráulica para la generación de electricidad en el río San Vicente, aplicable su uso en zona rural**” [3] se obtuvieron los dos caudales que nosotros determinamos por métodos indirectos. Para el caudal que servirá para la selección de la turbina este trabajo uso el método de aforo directo conocido como el método sección-pendiente, y del cual se obtuvo el siguiente resultado

Tabla IV.10 Tabla de valores obtenidos por el método sección – pendiente.

Descripción	Gasto promedio [m ³ /s]
Sección 1	4.45
Sección 2	3.67
Sección 3	2.84
Rio San Vicente	3.66

Tabla 4.5 Gasto calculado en cada sección y del Rio San Vicente.

Precisando, el caudal determinado en el trabajo que se referencia acá y el obtenido por la metodología se refieren al misma zona geográfica. El autor de la referencia [30] expresa lo siguiente en su trabajo, para afirmar el resultado obtenido:

“Resultado de los parámetros medidos en campo de área, velocidad y gasto del Rio San Vicente. Luego de haber realizado los aforos por el método de vadeo y obtener las velocidades respectivamente, que conjuntamente con el área de cada sección se obtuvo el caudal del río, se compararon con los caudales medidos en la estación Hidrométrica Tzimol Caída CFE (1963-1967), y se pudo observar que están en los rangos reales de caudales que siempre ha tenido el Rio San Vicente en época de estiaje”

Por lo tanto consideramos este caudal como representativo y con el cual compararemos el que fue obtenido por nosotros. Por lo tanto si tomamos como medida parámetro la obtenida por el trabajo de comparación tenemos que:

$$\alpha = \frac{Q_{ind}}{Q_{dir}} \quad (IV-1)$$

En donde:

α = Índice de confianza.

Q_{ind} = Caudal indirecto (obtenido del método indirecto)

Q_{dir} = Caudal directo (obtenido a partir de aforo)

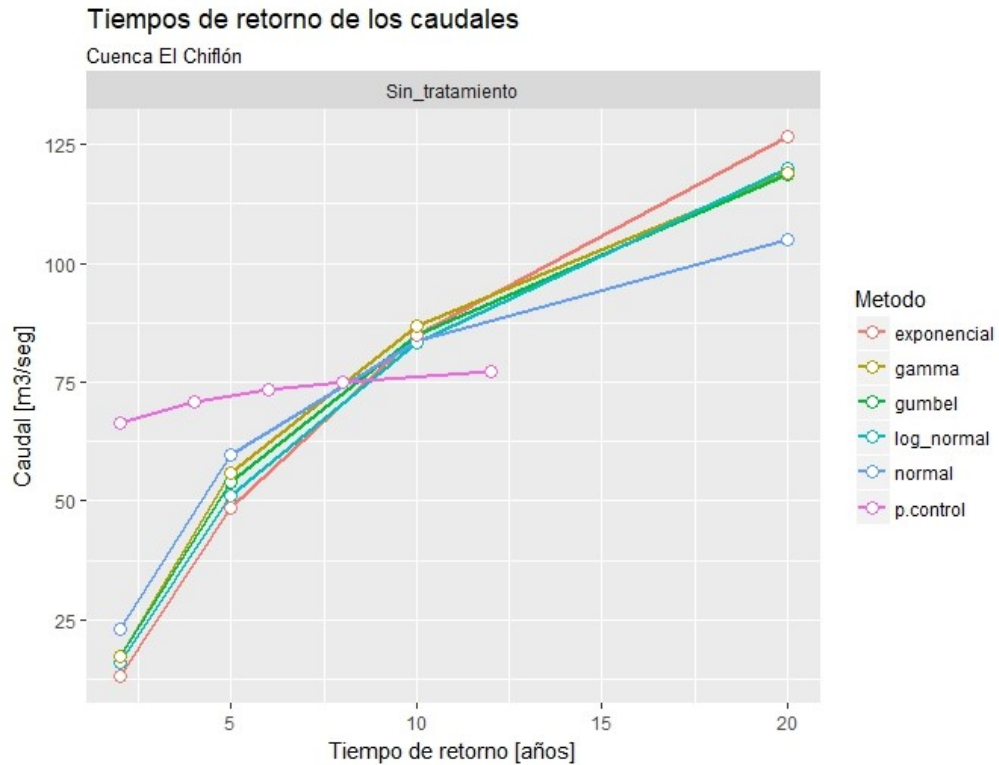
$$\alpha = \frac{3.03 \text{ m}^3/\text{s}}{3.66 \text{ m}^3/\text{s}} * 100$$

$$\alpha = 83\%$$

Esto significa que nuestro cálculo tiene un 83% de probabilidad de representar el caudal estimado de forma directa.

Por otra parte en ese mismo trabajo se obtuvo de manera indirecta a través del método estadístico hidráulico de Gumbel el caudal, al igual que nuestro caso el muestreo se realizó en tres estaciones cercanas a su propia zona de estudio que es la misma que nuestro caso, la única diferencia es que el muestreo de este análisis estadístico fue de 22 años, mientras que nuestro estudio está argumentado a través de 44 años.

En la gráfica siguiente se muestra un acercamiento a los datos obtenidos a través de nuestro análisis y en la misma grafica se muestra la distribución de caudales calculada por el trabajo realizado por nuestra zona de control y se muestra un desfase entre nuestra distribución de caudales a través de los periodos de retorno y la distribución de caudales calculados por el trabajo con el que comparamos.



Gráfica IV.8 Comparación de caudales por métodos indirectos.

Algo de hacer notar entre el análisis de control y el determinado por este trabajo tienen una gran diferencia en el intervalo de tiempos de retorno mientras que el análisis de control tienen un análisis a través de 2, 4, 6, 8, 12 años de periodo de retorno el análisis mientras que esta metodología presenta un análisis que va desde un intervalo desde los 2 hasta los 1000 años de tiempo de retorno.

Debido a que la normatividad nos indica que para este caso de la determinación del caudal para el diseño de la infraestructura es necesario tomar valores de entre 50, 75 y 100 años de tiempo de retorno, la información del análisis de control es insuficiente por lo que la comparación no es confiable.

4.7 Conclusiones.

La presente metodología no pretende ser una solución única, por el contrario solo es una solución más dentro de la gran gama de aprovechamiento de recursos naturales actualmente ofertados en las energías renovables, por lo tanto pretende solo ser una opción complementaria con las demás por otro lado, es necesario precisar que esta metodología solo es una aproximación y su precisión dependerá del correcto análisis, tratamiento y depuración de los datos estadísticos, así como de la experiencia del proyectista al momento de evaluar estos.

El énfasis que se debe poner en el tratamiento de los datos es primordial ya que de ello dependerá el grado de confianza de este método. Ya que este trabajo pretende dar el antecedente y ser una herramienta de gran utilidad para los tomadores de decisiones. En resumen se puede concluir lo siguiente:

EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS TRAZADOS PARA EL ALCANCE DE LAS METAS DEL PROYECTO.

- CONCLUSIONES PARTICULARES:
- La importancia del establecimiento de los aspectos técnicos de la investigación radica en el hecho de estructurar una base técnica sólida para llevar a cabo el desarrollo del presente método, por lo tanto fue de gran importancia delimitar estos aspectos, en 3 áreas: manejo de los métodos estadísticos para el tratamiento de datos, los métodos hidrológicos para la obtención del caudal y las técnicas de manejo de bases de datos geográficas en Qgis lo cual se consiguió.
- En relación al diseño de SIG se consideraron los aspectos de la obtención de las bases de datos que lo alimentarán y que básicamente fueron extraídos de 3 fuentes: INEGI,

CONAGUA Y CEIEG en la obtención de estas bases de datos no existió algún problema debido a que todas ellas son de acceso libre.

- La construcción de SIG es importante ya que en este punto se establecen las formas en que las bases de datos serán usadas y a partir de ahí interpretar la información y obtener datos que nos servirán para la evaluación del método.
- En lo relacionado con la evaluación ocurrió una complicación al momento de la comparación de los resultados para la evaluación del método y esto debido a que solo se pudo comparar con una sola área de estudio, por lo tanto, se hacen algunas recomendaciones en el anexo de recomendaciones de este trabajo referente a este punto.
- CONCLUSIONES GENERALES
- La precisión de este método depende del correcto análisis, tratamiento y depuración de los datos de precipitación obtenidos de los registros de las estaciones meteorológicas así como de la **interpretación** del proyectista.
- Uno de los objetivos colaterales de este proyecto es impulsar la descentralización de la generación de energía eléctrica buscando la autonomía de las comunidades que tengan las condiciones para implementar un proyecto de esta naturaleza.
- Este trabajo es solo una opción más a considerar en el espectro conocido del aprovechamiento de los recursos naturales para la transformación de energía (solar, eólico, biomasa, etc.) y que buscan como objetivo único la sustentabilidad de los pueblos. Pretende sumar.

A. Anexos.

A.1 Recomendaciones y trabajos próximos.

El presente trabajo es solo el inicio en el emprendimiento de una iniciativa enfocada hacia el aprovechamiento del recurso hidráulico disponible en el estado de Chiapas, por lo tanto es solo el antecedente de una serie de trabajos secuenciados que requieren ciertas recomendaciones para validar el método que aquí se propone, y que por lo tanto a continuación en los siguientes dos subtemas se enlistan.

a.1. Recomendaciones.

Dado el acotado tiempo de este trabajo de investigación el presente trabajo no se concentró en estudios a través de métodos directos de mediciones hidrométricas a las corrientes principales de las zonas de estudio acá abordadas y por lo tanto se recomienda que para tener mayores argumentos para la validez del presente método es preciso realizar las siguientes actividades:

- Realizar trabajos de campo y de estudio hidrométrico directo en las zonas de: El Hular, Chicoasen, San Andrés Puerto Rico, Grijalva y la Angostura.
- Las zonas para realizar el estudio de sección-pendiente del método directo deberán realizarse próximas a el drenaje de salida de la cuenca de estudio teniendo como referencia su sección central aproximadamente 2 kilómetros ríos arriba de la salida de la cuenca que se muestran en los mapas del anexo A.2.
- Seguir las metodologías para estudios hidrométricos de cualquier bibliografía de uso común pero se propone seguir la metodología proveniente del libro de Aparicio Mijares [28].

- Comparar los resultados obtenidos por los métodos directos con los resultados de los obtenidos y plasmados en la parte A.2 de este anexo.

a.2. Trabajos próximos.

Como ya se mencionó, el alcance del presente proyecto es limitado por los tiempos de su ejecución, sin embargo va más allá de la presente metodología y de su validación para su uso aplicable a cualquier zona de estudio que cuente con la suficiente información de registro de lluvias y que se encuentren cercanas a un afluente natural.

De ser comprobada y validada como una herramienta que nos conduzca a una aproximación bastante buena para la determinación de los posibles potenciales para la generación eléctrica a través de la energía hidráulica, esta metodología será la herramienta fundamental para realizar un mapeo de regiones que cuenten con las dos condiciones principales que en este estudio maneja para la selección de áreas con posibilidad que generación eléctrica a través de sus fuentes hidráulicas; las cuales son registros de precipitaciones disponibles y afluentes cercanos disponibles.

Por lo tanto y para llegar a esa meta se recomiendan dar continuación a esta investigación con los siguientes trabajos:

- Realización de una publicación en una revista científica (de preferencia indexada) con el fin de exponer el presente análisis al escrutinio de los expertos y referentes de estos temas a nivel mundial, no solo para la validación del presente método sino también buscando retroalimentación para su mejora.
- Realización de un mapeo a pequeñas áreas de estudio que agrupen un número determinado de microcuencas y que cubran un sector determinado del estado de Chiapas a modo de validar los tiempos y las cantidades de zonas que se pueden estudiar con el presente método.

- Realizar en un futuro un mapeo del potencial hídrico para la generación eléctrica del estado de Chiapas a través de este método que permita tener una herramienta o antecedente para la toma de decisiones en proyectos de electrificación a diferentes zonas.

A.2 Mapas y resultados.

En el anexo a este trabajo se muestran los resultados de las cinco zonas de estudio restantes, que forman parte del presente trabajo de investigación. Sólo se presentaran los mapas obtenidos y los resultados de los caudales que nos servirán para cada uno de los intereses que buscamos (la infraestructura y la obtención del potencial hídrico y al final se muestra una tabla comparativa de caudales obtenidos y los potenciales hídricos para la generación eléctrica para cada zona, para de este modo tener una perspectiva de la importancia de cada uno de los estudios fundamentales abordados en este proyecto, los estudios geomorfológicos y el análisis estadístico de precipitaciones.

1. Zona de estudio “El Hular”.

La micro cuenca “El Hular” se localiza en el estado de Chiapas al sur-este de México en una latitud 15°05’45” N y longitud 92°23’24” W, se eligió esta zona por dos de los tres criterios principales, siendo estos dos, los que están sustentados en los requerimientos que nuestra metodología propone y los cuales son: la disposición de recurso natural, (corrientes perennes) y por otro lado la cercanía de estaciones meteorológicas que proporcionen datos de precipitación para el análisis y la estimación del caudal.

1.1 Mapa de Ubicación y geomorfología.

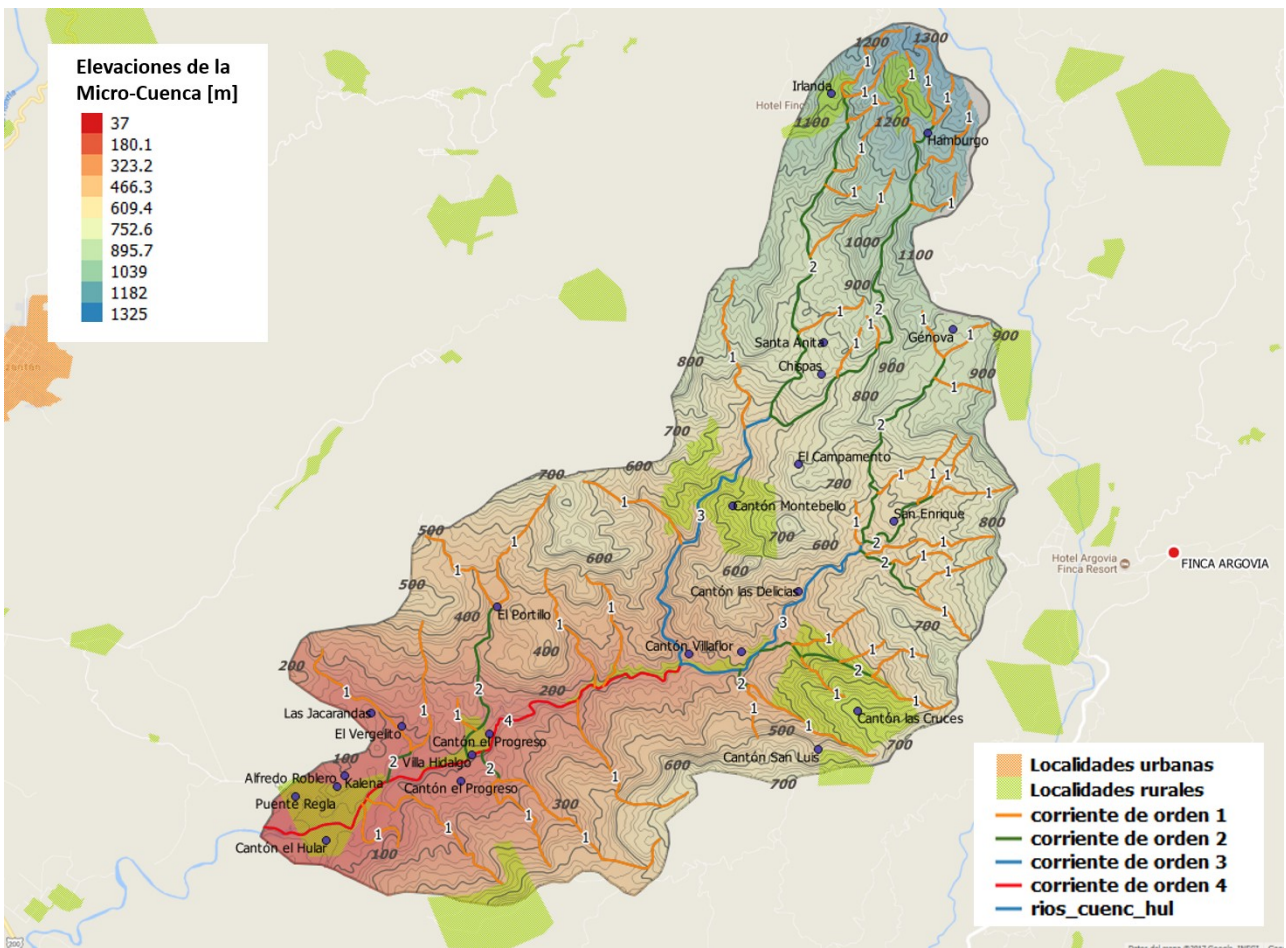
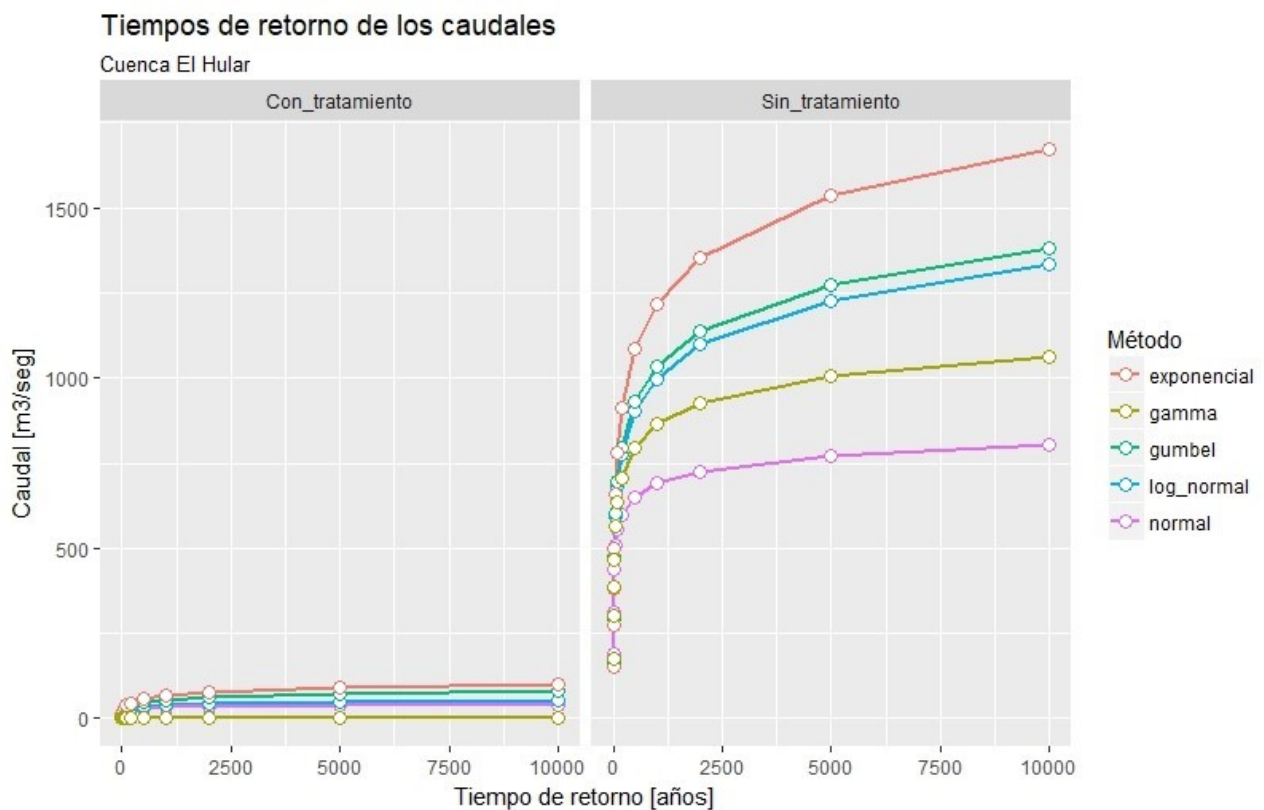


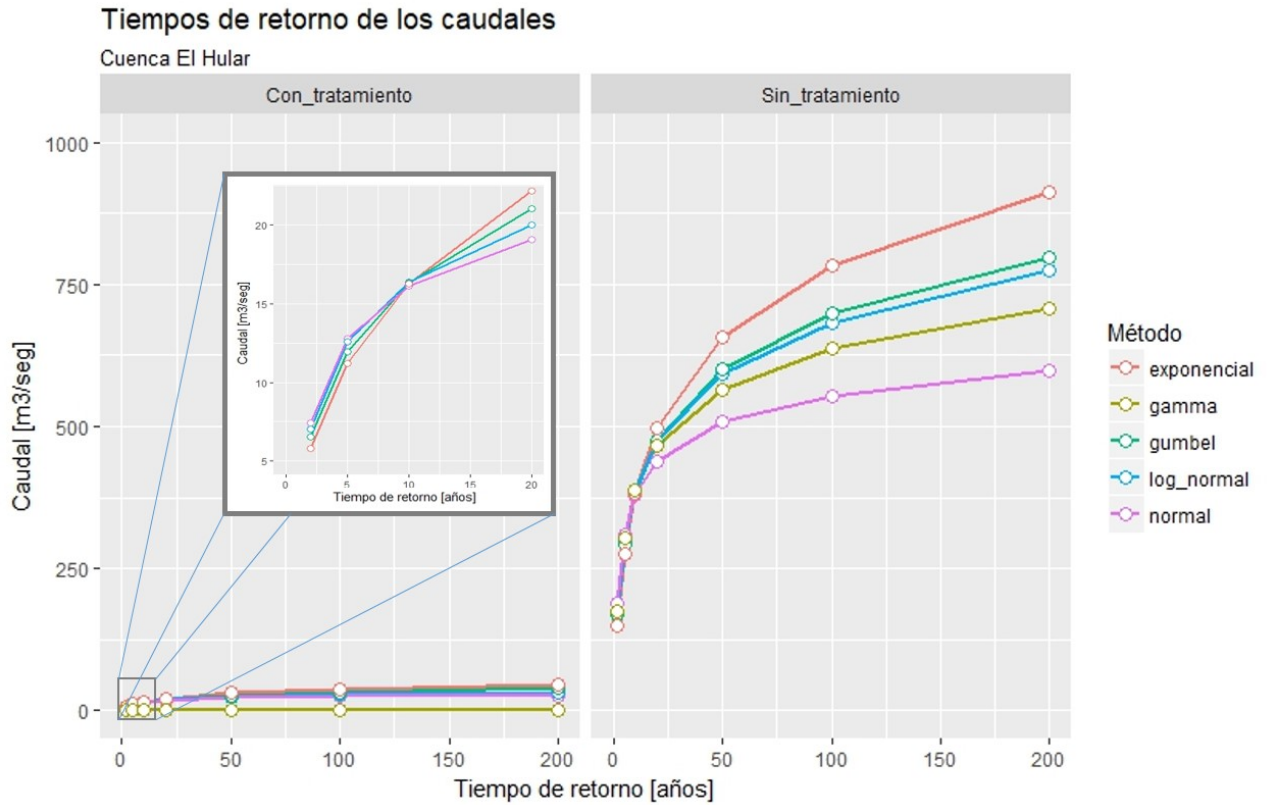
Figura A.1 Zona de estudio “El Hular” información geomorfológica.

1.2 Resultados de los análisis estadísticos de precipitación y Caudales de estudio.

Los caudales obtenidos a través del análisis estadístico de las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio son el fundamento de estos resultados y como ya se analizó en capítulos anteriores, cada caudal tiene un significado que representa una decisión que depende del proyectista debido a la experiencia en este tipo de trabajos así como de la zona de estudio en la que se esté trabajando, en donde las condiciones geográficas y morfológicas del terreno condicionan los escurrimientos y por lo tanto los caudales.



Gráfica A.1 Caudales estimados hasta periodos de retorno de 1000 años.



Gráfica A.2 Caudales para la obtención del diseño de infraestructura y el potencial hidráulico.

Caudal para el diseño de la infraestructura.

Tabla A.1 Caudal de diseño para la infraestructura por los diversos métodos.

Periodo de retorno 100 años	
Método	Caudal [m³/s]
Normal	554.72
Log – normal	682.79
Gumbel	697.73
Exponencial	782.85
Gamma	637.07
Promedio	671.04

Caudal para la obtención del potencial hidráulico.

Tabla A.2 Caudal para la determinación del potencial hidráulico.

Periodo de retorno 5 años		Periodo de retorno 10 años	
Método	Caudal [m ³ /s]	Método	Caudal [m ³ /s]
Normal	12.77	Normal	16.09
Log – normal	12.59	Log – normal	16.34
Gumbel	11.93	Gumbel	16.29
Exponencial	11.18	Exponencial	16.26
Gamma	0.00	Gamma	0.00
Promedio	12.12	Promedio	16.25

Resumen de la obtención de los caudales para la proyección.

Tabla A.3 Caudales para la elaboración de anteproyectos de electrificación.

Caudal para selección de turbina	Caudal máximo de diseño para infraestructura
11.93 m ³ /s	671.04 m ³ /s

Según los criterios de análisis los caudales son los presentados en la anterior tabla, la conversión del caudal en potencial eléctrico está definida por la fórmula vista en el capítulo de resultados y para un mismo $H = 62$ m tenemos que el potencial estimado de esta zona es de:

$$P = 7.25 \text{ MW (estimados para la generación eléctrica)}$$

2. Zona de estudio “San Andrés Puerto Rico”.

La micro cuenca “El Hular” se localiza en el estado de Chiapas al sur-este de México en una latitud $15^{\circ}05'45''$ N y longitud $92^{\circ}23'24''$ W, se eligió esta zona por dos de los tres criterios principales, siendo estos dos, los que están sustentados en los requerimientos que nuestra metodología propone y los cuales son: la disposición de recurso natural, (corrientes perennes) y por otro lado la cercanía de estaciones meteorológicas que proporcionen datos de precipitación para el análisis y la estimación del caudal.

2.1 Mapa de Ubicación y geomorfología.

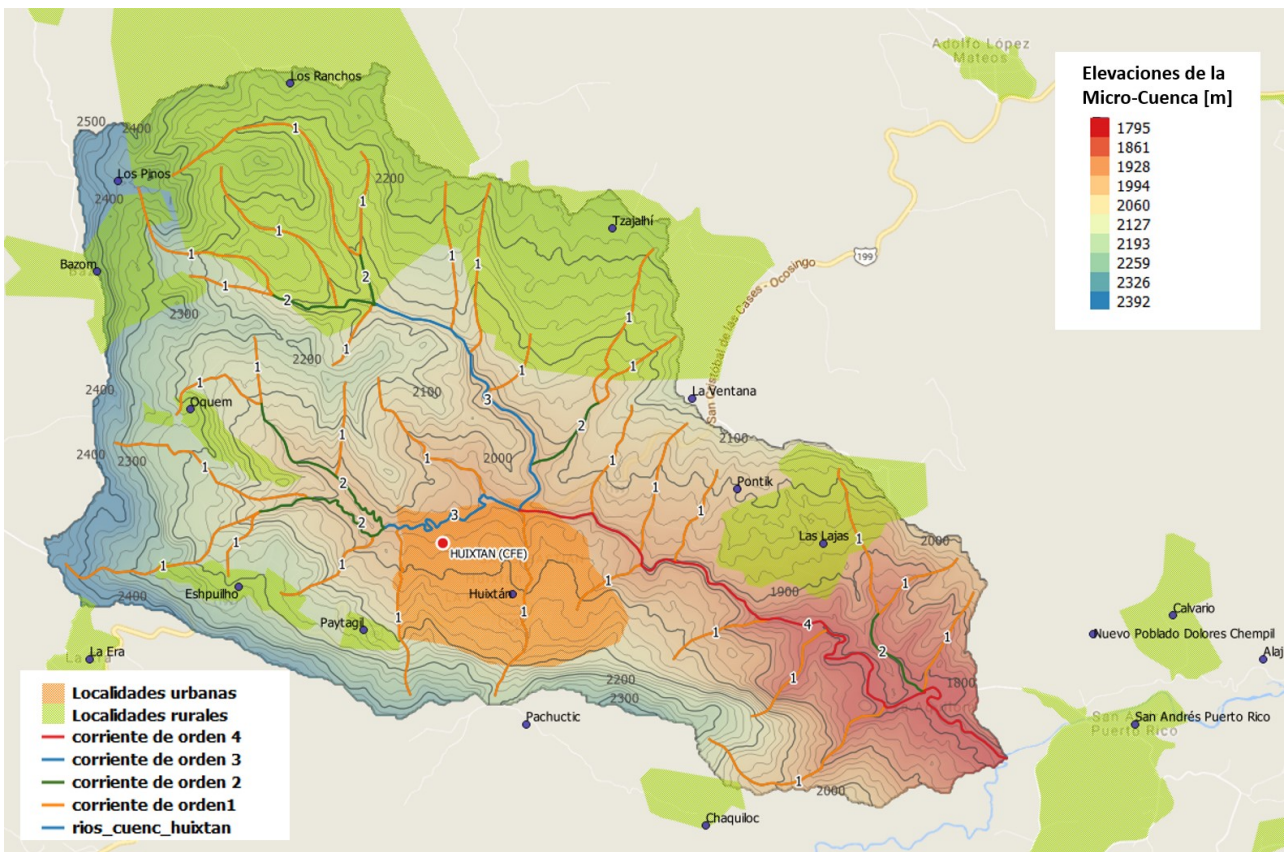
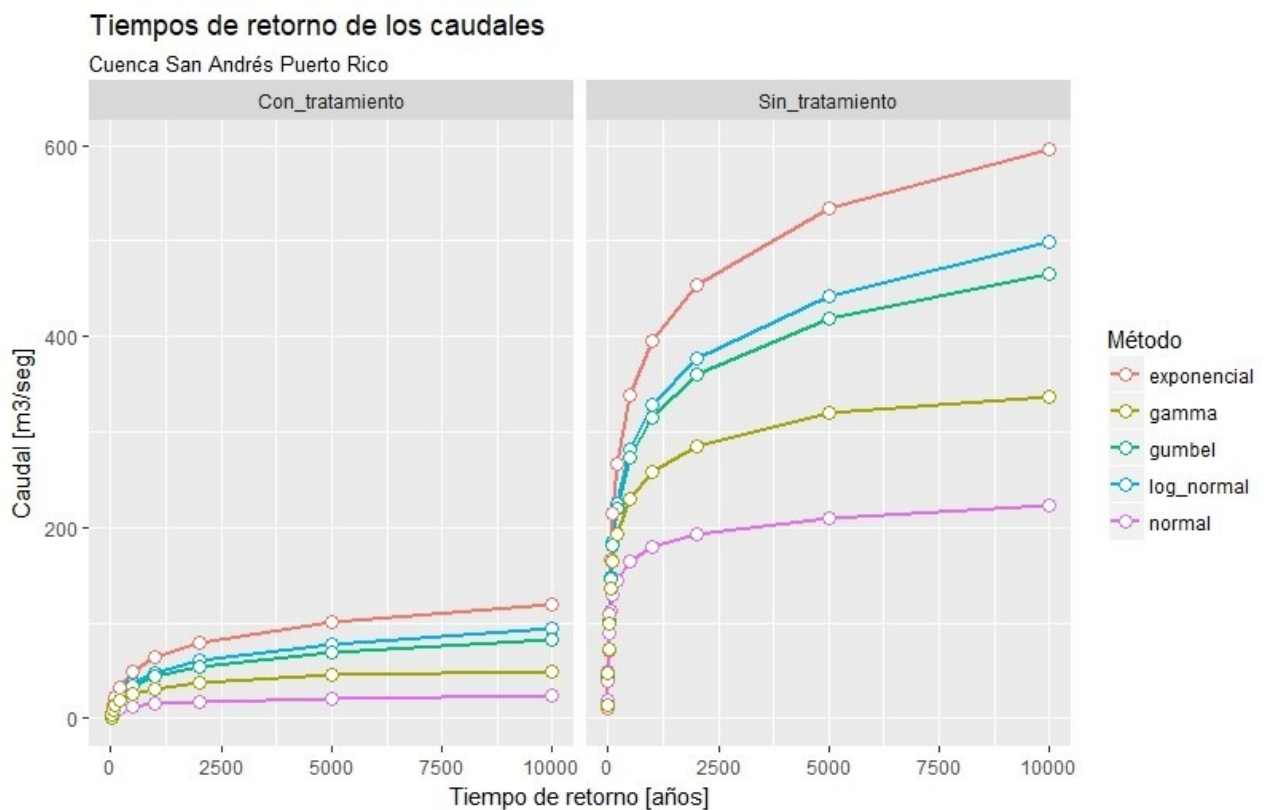


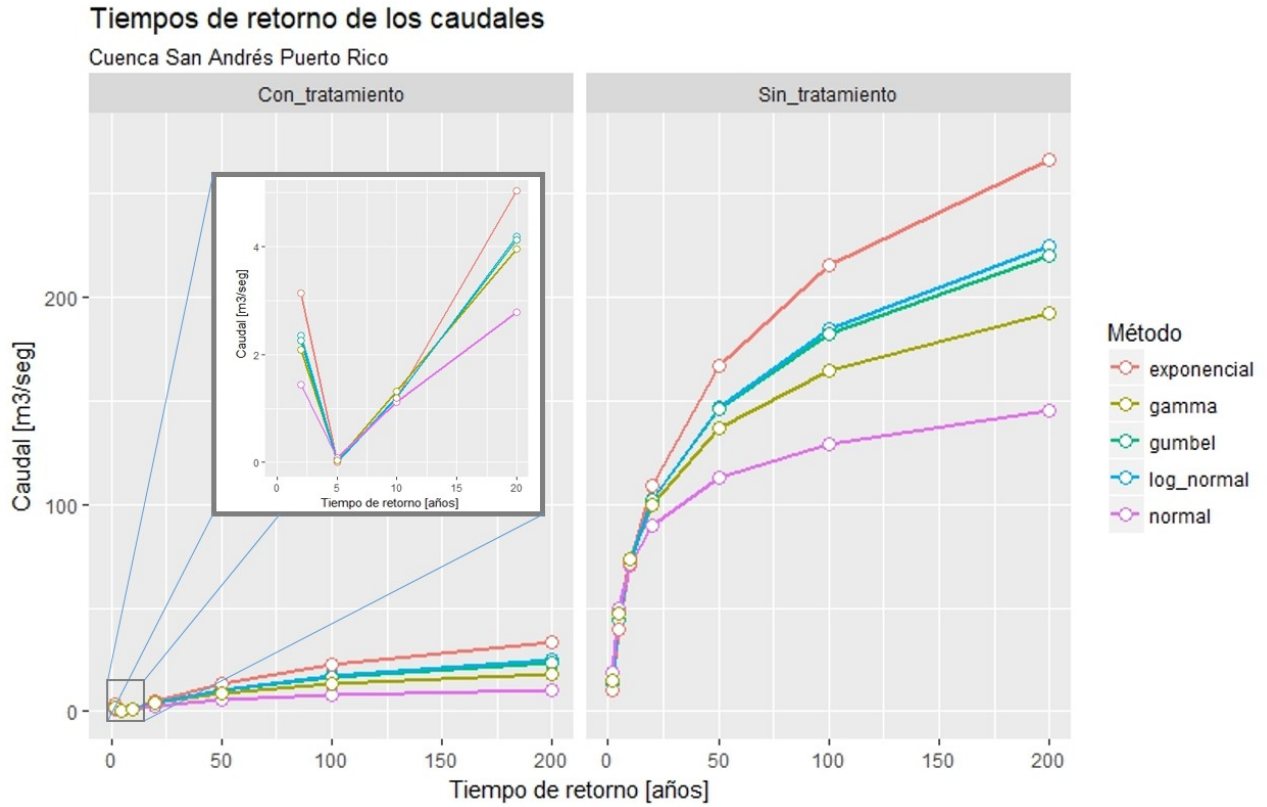
Figura A.2 Zona de estudio “San Andrés” información geomorfológica.

2.2 Resultados de los análisis estadísticos de precipitación y Caudales de estudio.

Los caudales obtenidos a través del análisis estadístico de las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio son el fundamento de estos resultados y como ya se analizó en capítulos anteriores, cada caudal tiene un significado que representa una decisión que depende del proyectista debido a la experiencia en este tipo de trabajos así como de la zona de estudio en la que se esté trabajando, en donde las condiciones geográficas y morfológicas del terreno condicionan los escurrimientos y por lo tanto los caudales.



Gráfica A.3 Caudales estimados hasta periodos de retorno de 1000 años.



Gráfica A.4 Caudales para la obtención del diseño de infraestructura y el potencial hidráulico.

Caudal para el diseño de la infraestructura.

Tabla A.4 Caudal de diseño para la infraestructura por los diversos métodos.

Periodo de retorno 100 años	
Método	Caudal [m³/s]
Normal	129.34
Log – normal	184.36
Gumbel	182.13
Exponencial	215.01
Gamma	164.41
Promedio	175.05

Caudal para la obtención del potencial hidráulico.

Tabla A.5 Caudal para la determinación del potencial hidráulico.

Periodo de retorno 2 años		Periodo de retorno 10 años	
Método	Caudal [m ³ /s]	Método	Caudal [m ³ /s]
Normal	1.44	Normal	1.12
Log – normal	2.35	Log – normal	1.20
Gumbel	2.26	Gumbel	1.20
Exponencial	3.13	Exponencial	1.20
Gamma	2.09	Gamma	1.32
Promedio	2.25	Promedio	1.21

Resumen de la obtención de los caudales para la proyección.

Tabla A.6 Caudales para la elaboración de anteproyectos de electrificación.

Caudal para selección de turbina	Caudal máximo de diseño para infraestructura
2.26 m ³ /s	215.01 m ³ /s

Según los criterios de análisis los caudales son los presentados en la anterior tabla, la conversión del caudal en potencial eléctrico está definida por la fórmula vista en el capítulo de resultados y para un mismo $H = 62$ m (para todas las zonas y solo para parametrizar el potencial) tenemos que el potencial estimado de esta zona es de:

$$P = 1.37 \text{ MW (estimados para la generación eléctrica)}$$

3. Zona de estudio “Malpaso”.

La micro cuenca “Malpaso” se localiza en el estado de Chiapas al sur-este de México en una latitud $16^{\circ}25'11''$ N y longitud $92^{\circ}46'04''$ W, se eligió esta zona por dos de los tres criterios principales, siendo estos dos, los que están sustentados en los requerimientos que nuestra metodología propone y los cuales son: la disposición de recurso natural, (corrientes perennes) y por otro lado la cercanía de estaciones meteorológicas que proporcionen datos de precipitación para el análisis y la estimación del caudal.

3.1 Mapa de Ubicación y geomorfología.

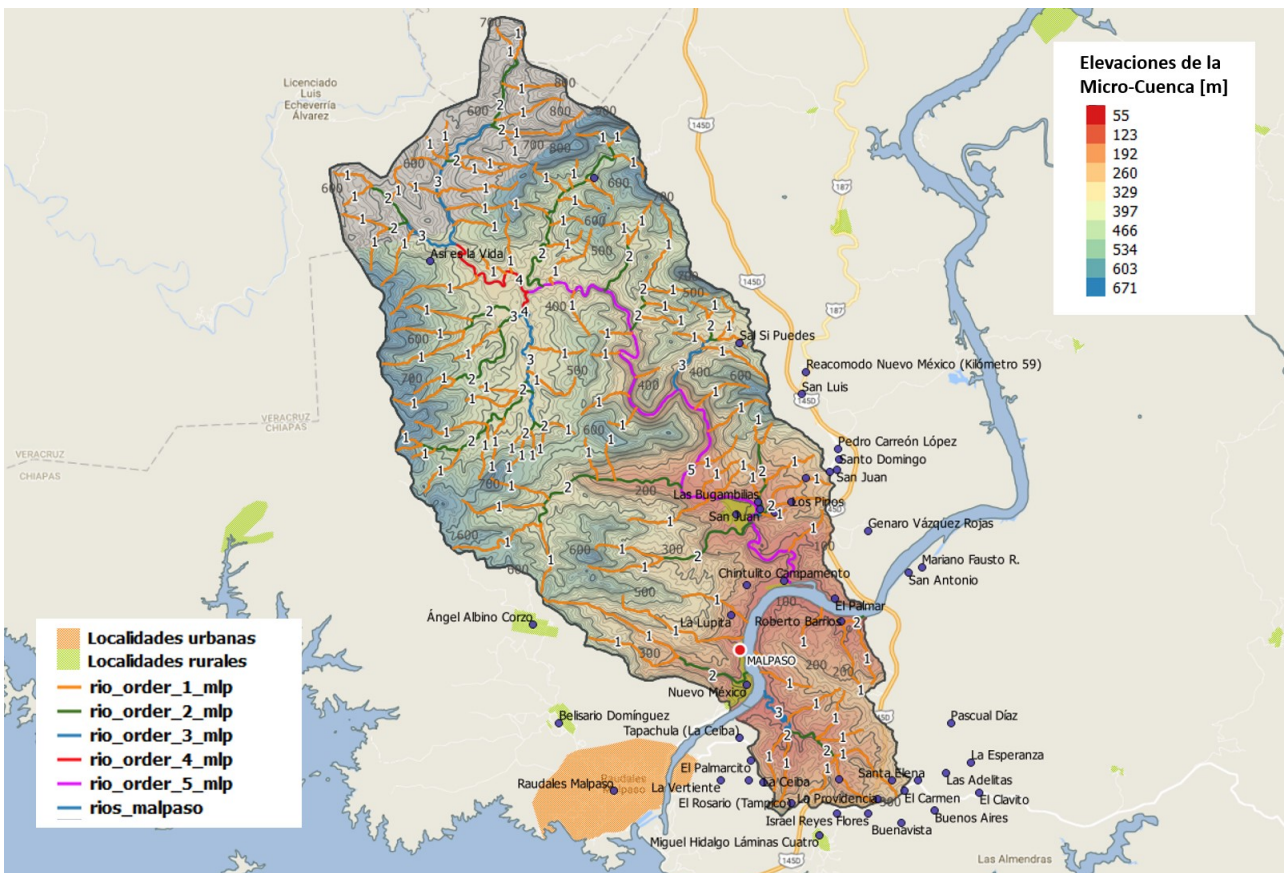
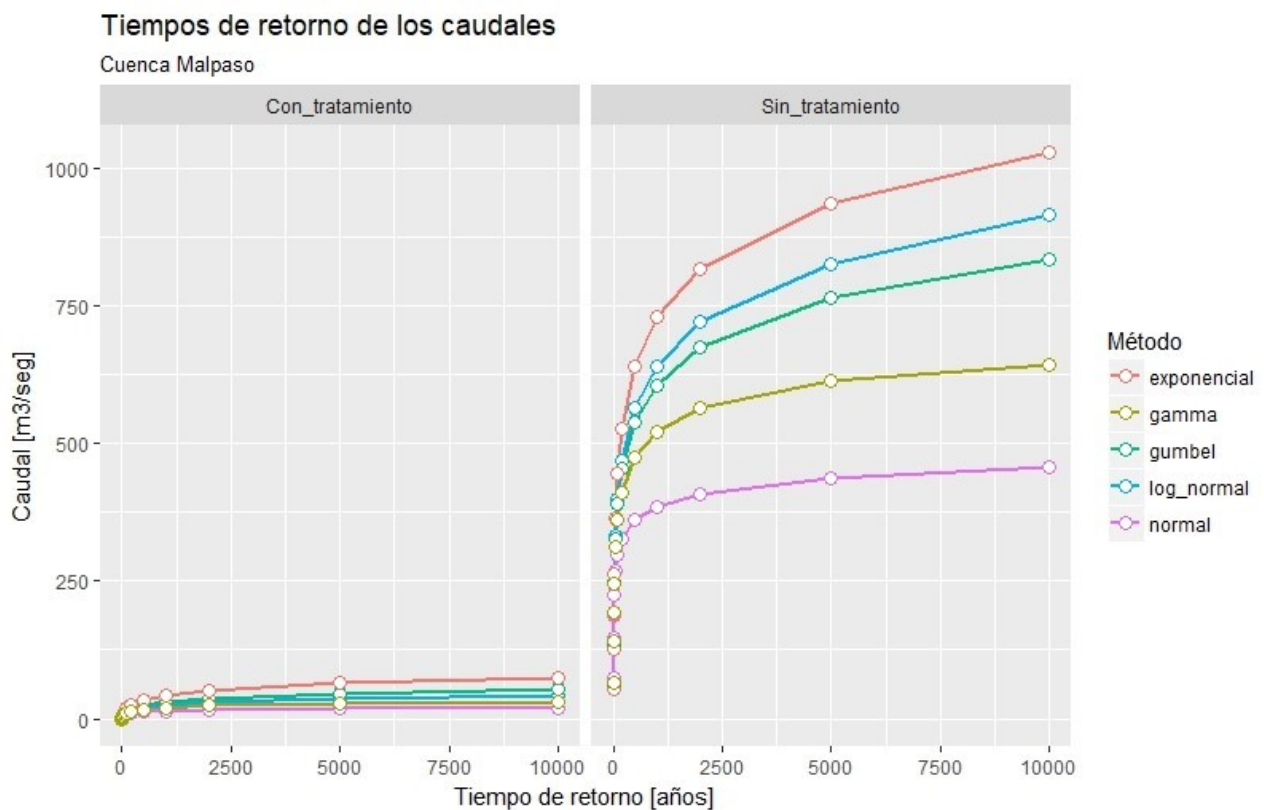


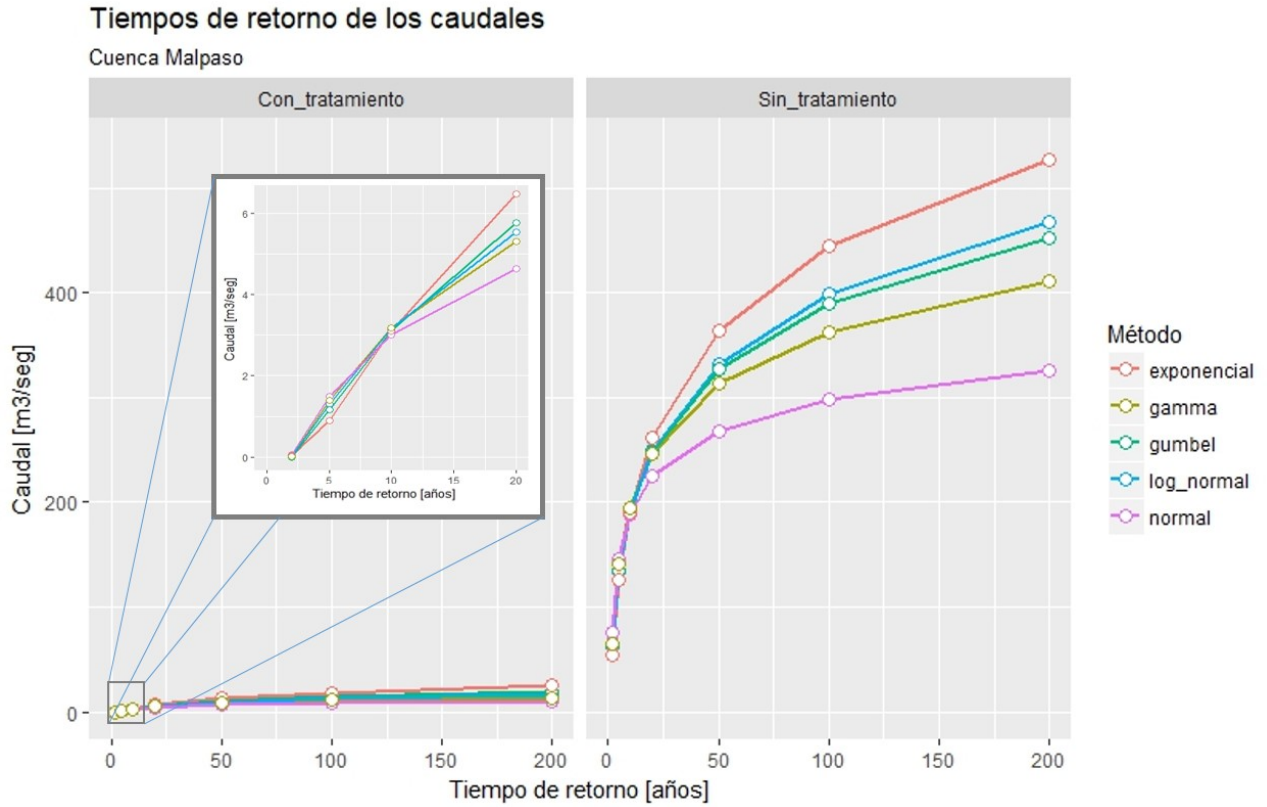
Figura A.3 Zona de estudio “Malpaso” información geomorfológica.

3.2 Resultados de los análisis estadísticos de precipitación y Caudales de estudio.

Los caudales obtenidos a través del análisis estadístico de las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio son el fundamento de estos resultados y como ya se analizó en capítulos anteriores, cada caudal tiene un significado que representa una decisión que depende del proyectista debido a la experiencia en este tipo de trabajos así como de la zona de estudio en la que se esté trabajando, en donde las condiciones geográficas y morfológicas del terreno condicionan los escurrimientos y por lo tanto los caudales.



Gráfica A.5 Caudales estimados hasta periodos de retorno de 1000 años.



Gráfica A.6 Caudales para la obtención del diseño de infraestructura y el potencial hidráulico.

Caudal para el diseño de la infraestructura.

Tabla A.7 Caudal de diseño para la infraestructura por los diversos métodos.

Periodo de retorno 100 años	
Método	Caudal [m³/s]
Normal	298.10
Log – normal	398.25
Gumbel	389.41
Exponencial	444.22
Gamma	362.67
Promedio	378.53

Caudal para la obtención del potencial hidráulico.

Tabla A.8 Caudal para la determinación del potencial hidráulico.

Periodo de retorno 10 años		Periodo de retorno 20 años	
Método	Caudal [m ³ /s]	Método	Caudal [m ³ /s]
Normal	3.01	Normal	4.63
Log – normal	3.17	Log – normal	5.54
Gumbel	3.11	Gumbel	5.77
Exponencial	3.10	Exponencial	6.49
Gamma	3.19	Gamma	5.32
Promedio	3.11	Promedio	5.55

Resumen de la obtención de los caudales para la proyección.

Tabla A.9 Caudales para la elaboración de anteproyectos de electrificación.

Caudal para selección de turbina	Caudal máximo de diseño para infraestructura
3.11 m ³ /s	444.22 m ³ /s

Según los criterios de análisis los caudales son los presentados en la anterior tabla, la conversión del caudal en potencial eléctrico está definida por la fórmula vista en el capítulo de resultados y para un mismo $H = 62$ m (para todas las zonas y solo para parametrizar el potencial) tenemos que el potencial estimado de esta zona es de:

$$P = 1.89 \text{ MW (estimados para la generación eléctrica)}$$

4. Zona de estudio “La Angostura”.

La micro cuenca “La Angostura” se localiza en el estado de Chiapas al sur-este de México en una latitud $16^{\circ}24'00''$ N y longitud $92^{\circ}24'00''$ W, se eligió esta zona por dos de los tres criterios principales, siendo estos dos, los que están sustentados en los requerimientos que nuestra metodología propone y los cuales son: la disposición de recurso natural, (corrientes perennes) y por otro lado la cercanía de estaciones meteorológicas que proporcionen datos de precipitación para el análisis y la estimación del caudal.

4.1 Mapa de Ubicación y geomorfología.

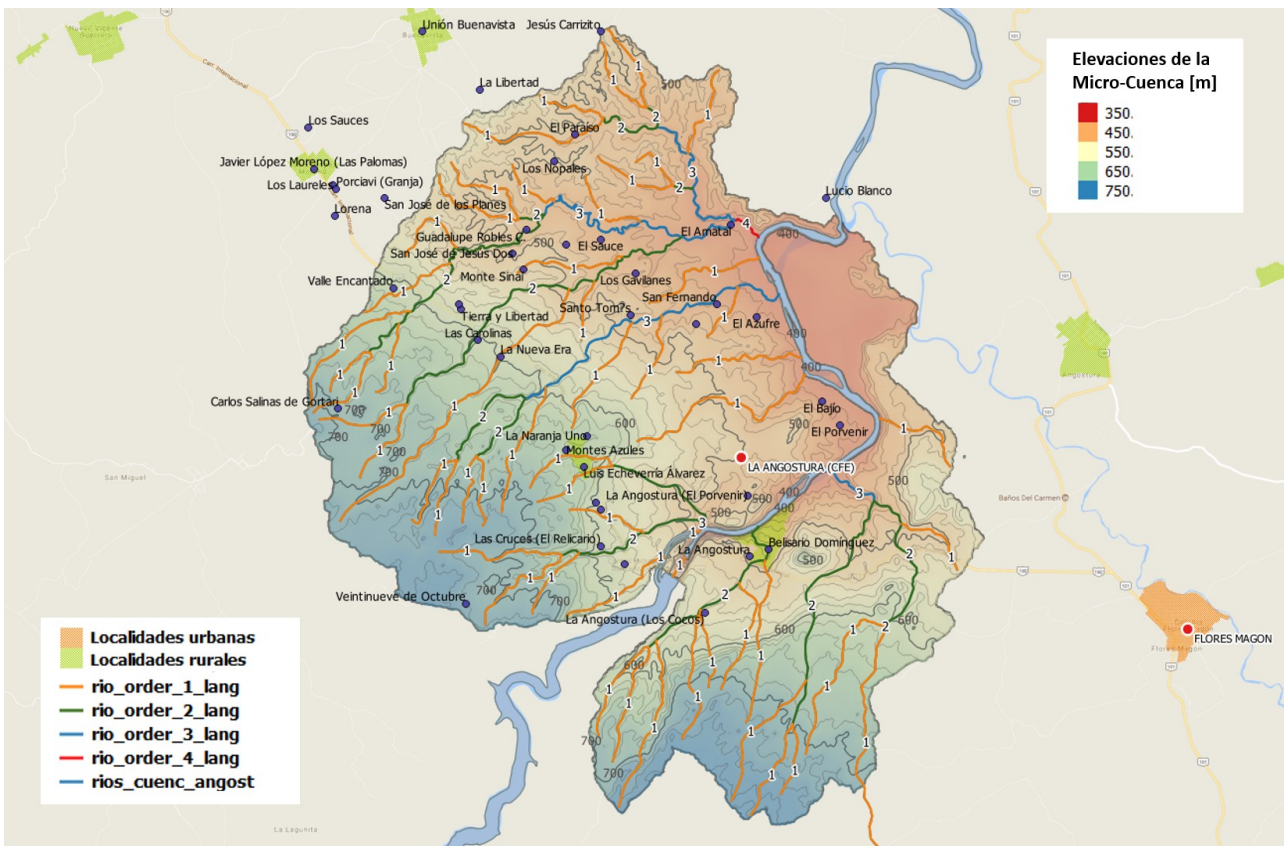
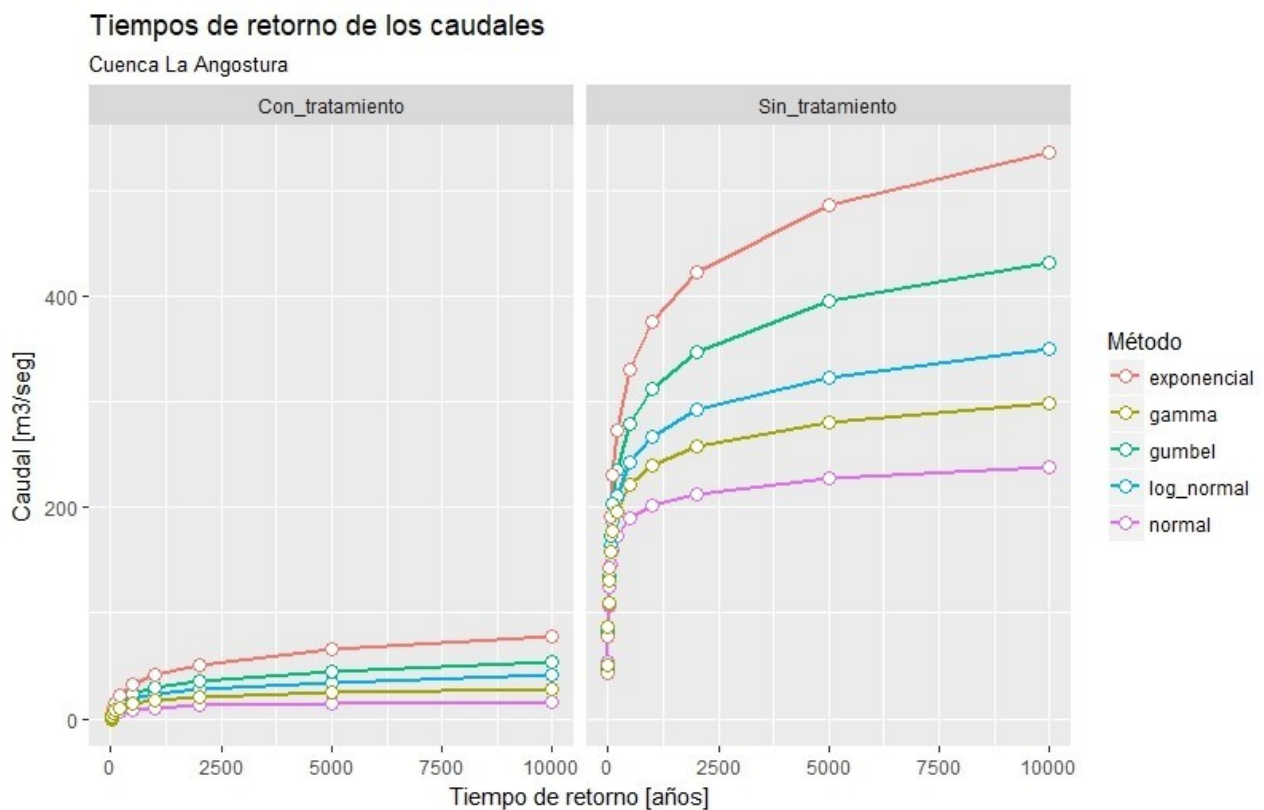


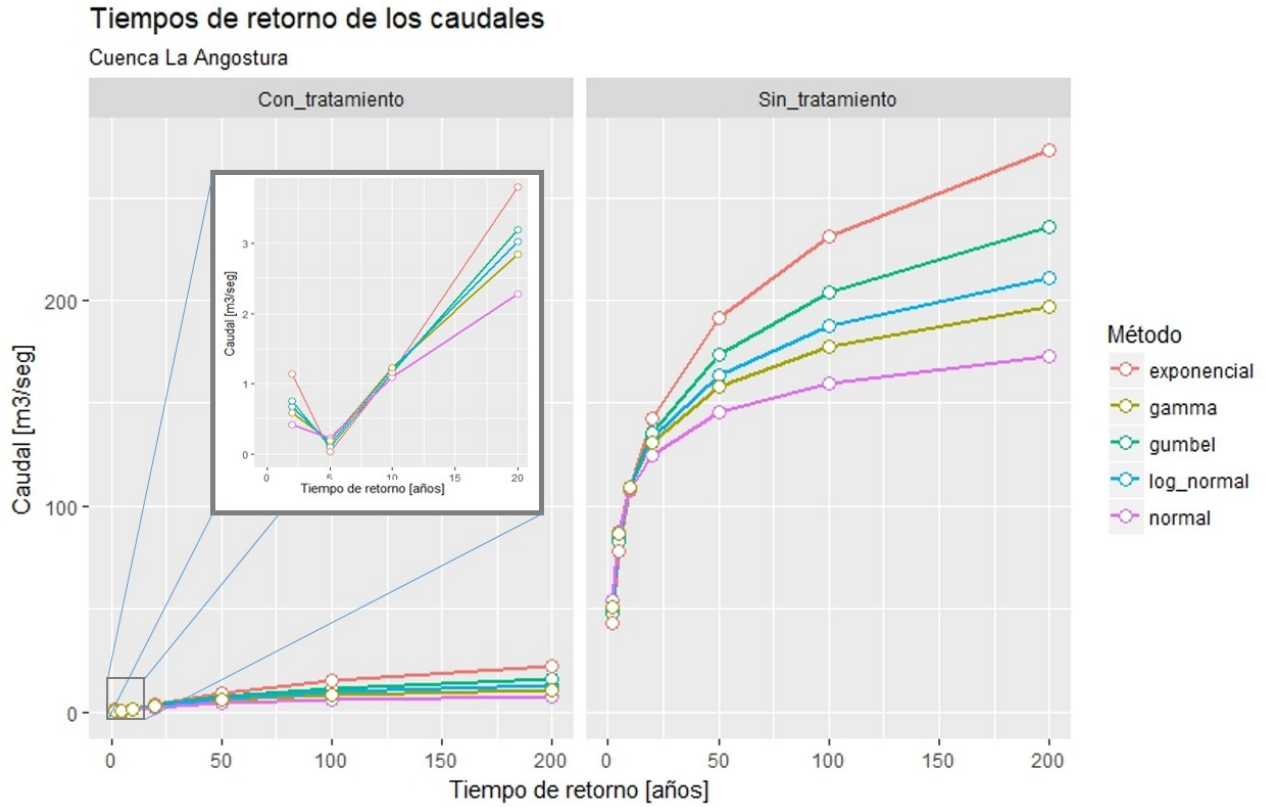
Figura A.4 Zona de estudio “La Angostura” información geomorfológica.

4.2 Resultados de los análisis estadísticos de precipitación y Caudales de estudio.

Los caudales obtenidos a través del análisis estadístico de las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio son el fundamento de estos resultados y como ya se analizó en capítulos anteriores, cada caudal tiene un significado que representa una decisión que depende del proyectista debido a la experiencia en este tipo de trabajos así como de la zona de estudio en la que se esté trabajando, en donde las condiciones geográficas y morfológicas del terreno condicionan los escurrimientos y por lo tanto los caudales.



Gráfica A.7 Caudales estimados hasta periodos de retorno de 1000 años.



Gráfica A.8 Caudales para la obtención del diseño de infraestructura y el potencial hidráulico.

Caudal para el diseño de la infraestructura.

Tabla A.10 Caudal de diseño para la infraestructura por los diversos métodos.

Periodo de retorno 100 años	
Método	Caudal [m³/s]
Normal	159.69
Log – normal	187.32
Gumbel	204.12
Exponencial	231.24
Gamma	177.37
Promedio	191.95

Caudal para la obtención del potencial hidráulico.

Tabla A.11 Caudal para la determinación del potencial hidráulico.

Periodo de retorno 10 años		Periodo de retorno 20 años	
Método	Caudal [m ³ /s]	Método	Caudal [m ³ /s]
Normal	1.10	Normal	2.28
Log – normal	1.20	Log – normal	3.03
Gumbel	1.16	Gumbel	3.20
Exponencial	1.16	Exponencial	3.80
Gamma	1.22	Gamma	2.84
Promedio	1.17	Promedio	3.03

Resumen de la obtención de los caudales para la proyección.

Tabla A.12 Caudales para la elaboración de anteproyectos de electrificación.

Caudal para selección de turbina	Caudal máximo de diseño para infraestructura
3.20 m ³ /s	231.24 m ³ /s

Según los criterios de análisis los caudales son los presentados en la anterior tabla, la conversión del caudal en potencial eléctrico está definida por la fórmula vista en el capítulo de resultados y para un mismo $H = 62$ m (para todas las zonas y solo para parametrizar el potencial) tenemos que el potencial estimado de esta zona es de:

$$P = 1.94 \text{ MW (estimados para la generación eléctrica)}$$

5. Zona de estudio “Grijalva”.

La micro cuenca “La Angostura” se localiza en el estado de Chiapas al sur-este de México en una latitud $16^{\circ}57'55''$ N y longitud $93^{\circ}07'13''$ W, se eligió esta zona por dos de los tres criterios principales, siendo estos dos, los que están sustentados en los requerimientos que nuestra metodología propone y los cuales son: la disposición de recurso natural, (corrientes perennes) y por otro lado la cercanía de estaciones meteorológicas que proporcionen datos de precipitación para el análisis y la estimación del caudal.

5.1 Mapa de Ubicación y geomorfología.

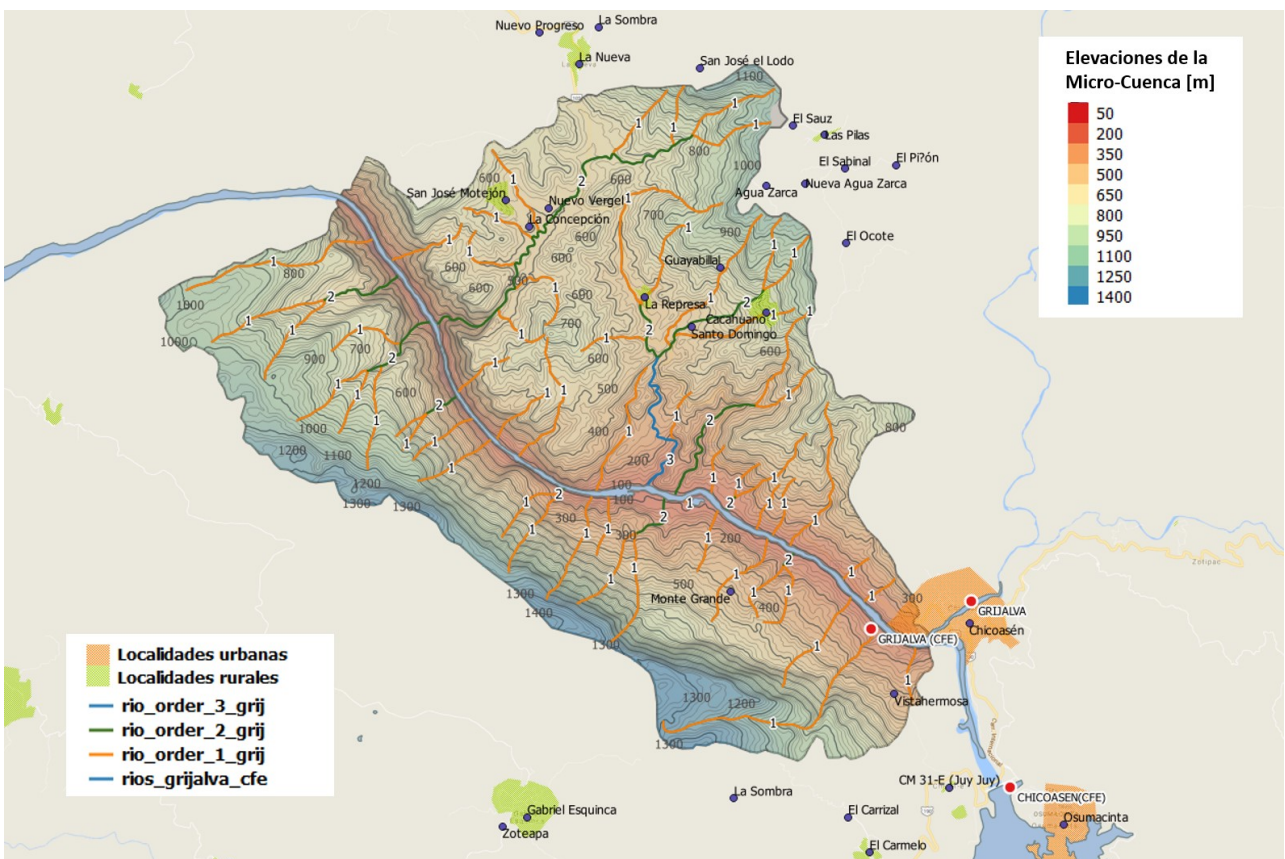
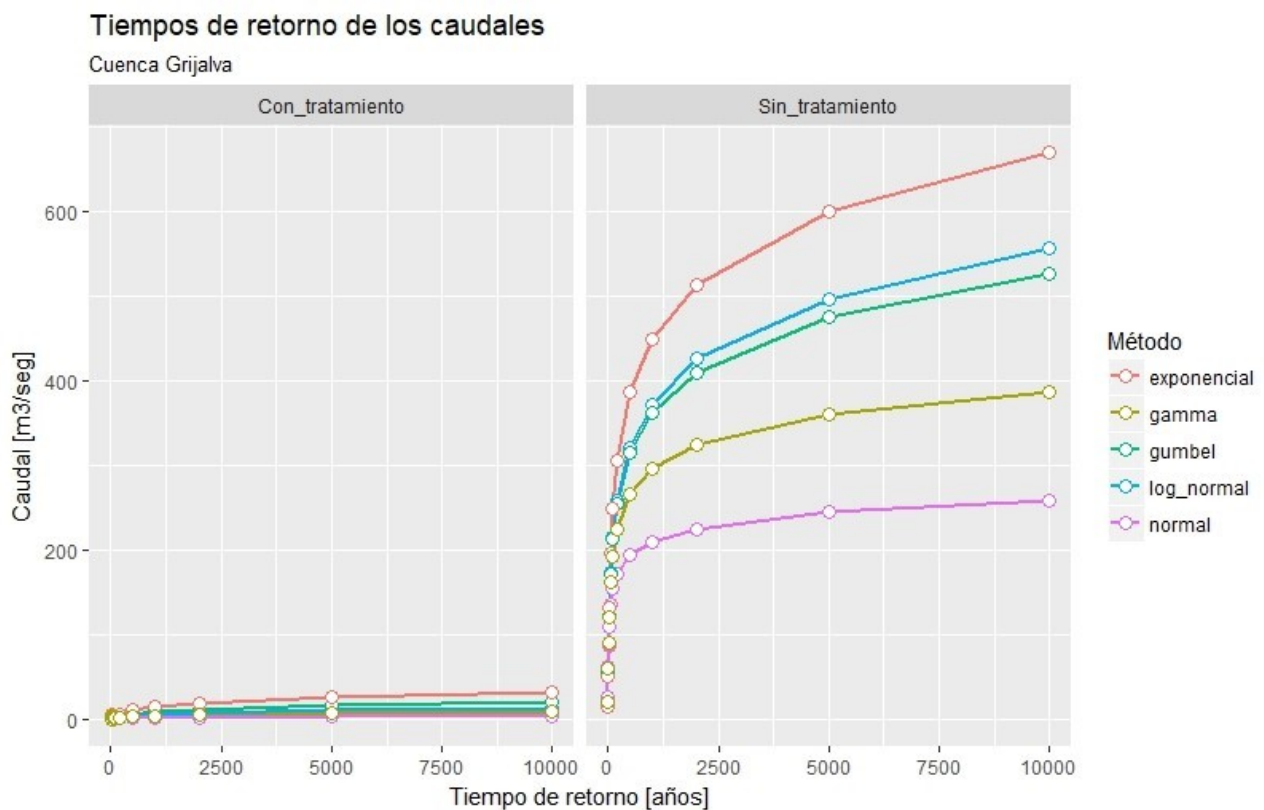


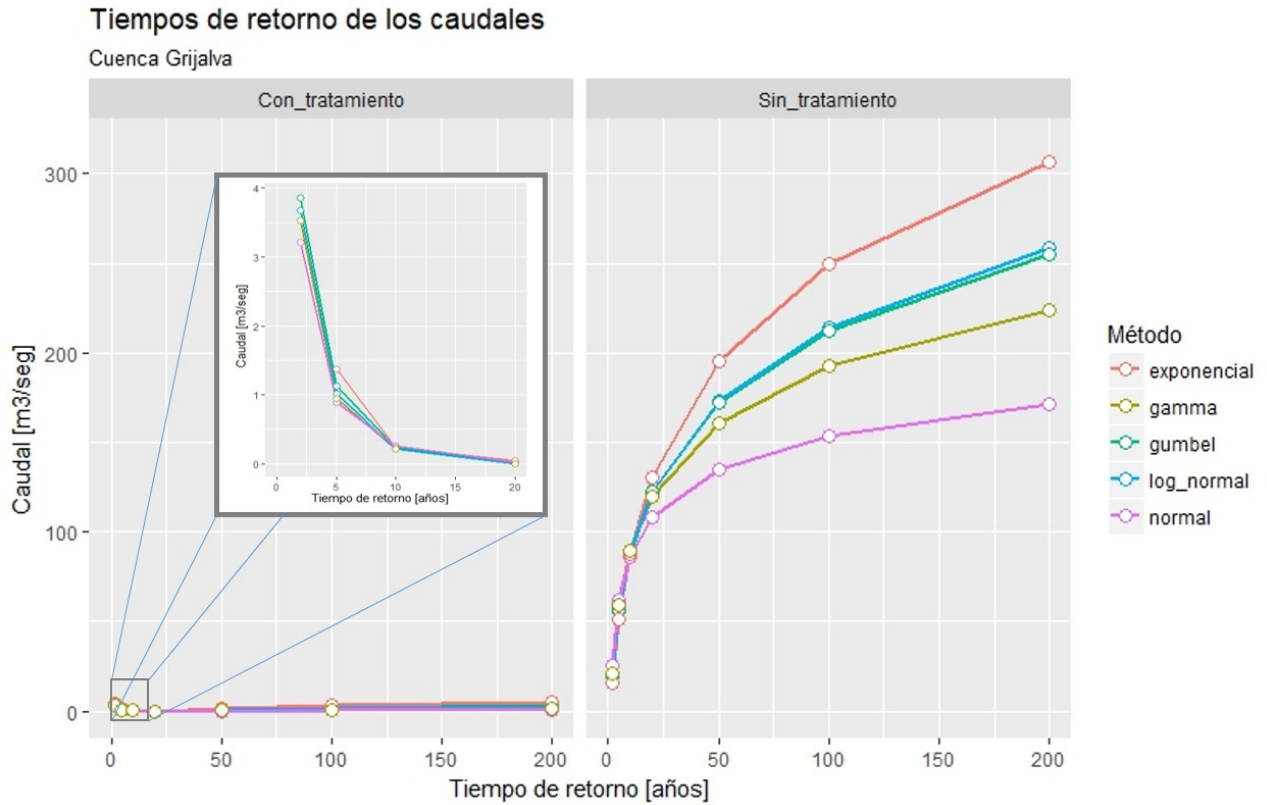
Figura A.5 Zona de estudio “Grijalva” información geomorfológica.

5.2 Resultados de los análisis estadísticos de precipitación y Caudales de estudio.

Los caudales obtenidos a través del análisis estadístico de las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio son el fundamento de estos resultados y como ya se analizó en capítulos anteriores, cada caudal tiene un significado que representa una decisión que depende del proyectista debido a la experiencia en este tipo de trabajos así como de la zona de estudio en la que se esté trabajando, en donde las condiciones geográficas y morfológicas del terreno condicionan los escurrimientos y por lo tanto los caudales.



Gráfica A.9 Caudales estimados hasta periodos de retorno de 1000 años.



Gráfica A.10 Caudales para la obtención del diseño de infraestructura y el potencial hidráulico.

Caudal para el diseño de la infraestructura.

Tabla A.13 Caudal de diseño para la infraestructura por los diversos métodos.

Periodo de retorno 100 años	
Método	Caudal [m³/s]
Normal	153.28
Log – normal	214.36
Gumbel	212.58
Exponencial	249.29
Gamma	192.36
Promedio	204.37

Caudal para la obtención del potencial hidráulico.

Tabla A.14 Caudal para la determinación del potencial hidráulico.

Periodo de retorno 2 años		Periodo de retorno 5 años	
Método	Caudal [m ³ /s]	Método	Caudal [m ³ /s]
Normal	2.00	Normal	5.00
Log – normal	3.22	Log – normal	0.88
Gumbel	3.68	Gumbel	1.01
Exponencial	3.86	Exponencial	1.12
Gamma	4.46	Gamma	1.37
Promedio	3.53	Promedio	0.94

Resumen de la obtención de los caudales para la proyección.

Tabla A.15 Caudales para la elaboración de anteproyectos de electrificación.

Caudal para selección de turbina	Caudal máximo de diseño para infraestructura
4.46 m ³ /s	249.29 m ³ /s

Según los criterios de análisis los caudales son los presentados en la anterior tabla, la conversión del caudal en potencial eléctrico está definida por la fórmula vista en el capítulo de resultados y para un mismo $H = 62$ m (para todas las zonas y solo para parametrizar el potencial) tenemos que el potencial estimado de esta zona es de:

$$P = 2.71 \text{ MW (estimados para la generación eléctrica)}$$

Bibliografía.

- [1] V. Shiva, “Las guerras del agua. Privatización, consumo y lucro.pdf.” p. 163, 2003.
- [2] V. Shiva, “The Violence of the Green Revolution,” *The Journal of Value Inquiry*, vol. 27. p. 264 ST-The Violence of the Green Revolution, 1991.
- [3] P. Kapitsa, “Experimento_Teoria_Practica.” URRS, p. 499, 1981.
- [4] IRENA, “Hydropower,” *Renew. Energy Technol. Cost Anal. Ser.*, vol. 1: Power s, no. 3/5, p. 44, 2012.
- [5] E. Ilskog, “Indicators for assessment of rural electrification—An approach for the comparison of apples and pears,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 7, pp. 2665–2673, 2008.
- [6] W. W. Purwanto and N. Afifah, “Assessing the impact of techno socioeconomic factors on sustainability indicators of microhydro power projects in Indonesia: A comparative study,” *Renew. Energy*, vol. 93, pp. 312–322, 2016.
- [7] J. Amador and J. Domínguez, “Application of geographical information systems to rural electrification with renewable energy sources,” *Renew. Energy*, vol. 30, no. 12, pp. 1897–1912, 2005.
- [8] SENER, “Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026,” pp. 1–156, 2012.
- [9] A. Omar, “Centrales hidroeléctricas de pequeña escala, la experiencia de la Fundación Solar en Guatemala energías renovables serie técnica,” 2013.

- [10] Luis Leal Monterroso, "Micro y mini hidroeléctricas en pequeñas comunidades," 2017.
- [11] M. L. Kavvas and D. J.W., "A stochastic cluster model of daily rainfall sequence," *Water resour*, vol. 17, no. No.4, p. 1151, 1981.
- [12] E. Waymire and V. K. Gupta, "The mathematical structure of rainfall representations I, A review of the stochastic rainfall models," *Water resour*, vol. 17, no. 5, p. 1261, 1981.
- [13] M. Abramowitz and A. Stegun, *Handbook of mathematical functions*, Vol 4. Ne york, 1968.
- [14] B. Bobee and R. Robitaille, "The use for the Pearson type 3 an LogPearson type 3 distribution revisited," *Water resour*, vol. 13, no. 2, p. 427, 1977.
- [15] J. López, "Sistemas de Información Geográfica en estudios de geomorfología ambiental y recursos naturales. Colección Seminarios," *Univ. Nac. Autónoma México*, vol. Colección, no. Facultad de Filosofía y Letras.
- [16] G. Wold, "Roger Tomlinson: the father of GIS. (GIS Wold Interview)." *GIS Wold* 9(4). Global, p. 4, 1996.
- [17] INEGI, "Sistemas de Información Geográfica," 2014.
- [18] "ArcGIS + Azure." [Online]. Available: <http://www.sigsa.info/productos/esri/arcgis-azure>.
- [19] QGIS PROJECT, "QGIS User guide 2.14." p. 254, 216AD.
- [20] O. Mesa *et al.*, "HIDRO-SIG: UNA HERRAMIENTA PARA LA ESTIMACIÓN DE BALANCES HIDROLÓGICOS DE COLOMBIA," p. 13.

- [21] M. C. Miguel, “Manual de operación de los programas AX.EXE Y CARACHID.EXE (PARA HIDROLOGÍA),” *Cent. Nac. prevención Desastr.*, 1997.
- [22] J. I. Vélez *et al.*, “HIDROSIG: UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS NATURALES Y MODELACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE,” *Serv. Sist. dínformació goeográfica I Teeledeteccció*, vol. 17, 2007.
- [23] D. I. Poveda, G., Vélez, J.I., Mesa, O.J., Cuartas, A., Barco, J., Mantilla, R., Mejía, J.F., Hoyos, C.D, Ramírez, J.M., Ceballos, L.I., Zuluaga, M.D., Arias, P.A., Botero, B.A, Montoya, M.I., Giraldo, J.D y Quevedo, “Linking Long- Term Water Balances And Statistical Scaling To Estimate River Flows Along The Rainage Network Of Colombia,” *J. Hydrol. Eng.*, 2006.
- [24] Barbosa Briones Elda, “DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE ArcGIS PARA EL CALCULO DE INDICADORES FISICOS Y SOCIOECONÓMICOS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS,” Universidad Autónoma de Querétaro, 2011.
- [25] M. M. Ubaldo, S. F. Ricardo, and M. R. M. Flor, “El Sistema de Información Geográfica para las Energías Geográfica para las Energías Renovables (SIGER) en México,” 2003.
- [26] E. Barbosa Briones, M. Ángel, and D. Cortázar, “HERRAMIENTAS DE SIG PARA EL CÁLCULO DE INDICADORES POBLACIONALES EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS.”
- [27] D. de P. de I. Financiada, “ATLAS NACIONAL DE ZONAS CON ALTO POTENCIAL DE ENERGÍAS LIMPIAS Dirección de Proyectos de Inversión Financiada.” México DF, p. 24, 2016.
- [28] F. Aparicio, Mijares, *Fundamentos de hidrología de superficie*, Primera. Mexico: limusa, 1989.
- [29] P. Y. A. S. de D. R. D. G. de A. para el D. R. COLEGIO DE POSTGRADUADOS;

SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL,
“HIDROLOGÍA APLICADA A LAS PEQUEÑAS OBRAS HIDRÁULICAS,” SAGARPA,
no. obras hidraulicas, 2012.

- [30] R. Fenton Peñalver, “Determinación del potencial de energía hidráulica para la generación de electricidad en el río San Vicente, aplicable su uso en zona rural,” Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, 2016.