

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**CAUSAS DE INUNDACIÓN DEL ÁREA NATURAL
PROTEGIDA LAGUNA EL JOCOTAL, UBICADA EN LA
CUENCA DEL RÍO GRANDE DE SAN MIGUEL**

PRESENTADO POR:

**GUILLERMO ARTURO CORNEJO HERNÁNDEZ
OSMIN ERNESTO CÓRDOVA MELÉNDEZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DE 2013.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR :

Ph.D. ING. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:
INGENIERO CIVIL

Título :
**CAUSAS DE INUNDACIÓN DEL ÁREA NATURAL
PROTEGIDA LAGUNA EL JOCOTAL, UBICADA EN LA
CUENCA DEL RÍO GRANDE DE SAN MIGUEL**

Presentado por :
**GUILLERMO ARTURO CORNEJO HERNÁNDEZ
OSMIN ERNESTO CÓRDOVA MELÉNDEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :
**ING. JOAQUÍN MARIANO SERRANO CHOTO
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
ING. JOSÉ MAURICIO MARTÍNEZ GARCÍA
ING. ROBERTO ADOLFO CERÓN PINEDA**

San Salvador, Agosto de 2013.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

ING. JOAQUÍN MARIANO SERRANO CHOTO

ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS

ING. JOSÉ MAURICIO MARTÍNEZ GARCÍA

ING. ROBERTO ADOLFO CERÓN PINEDA

Agradecimientos.

El desarrollo de este trabajo de graduación fue posible gracias al apoyo de muchas personas que participaron en distintas etapas de la investigación, a las cuales reconocemos su esfuerzo a continuación.

A nuestros docentes directores:

Ing. Joaquín Mariano Serrano Choto. Por su completa disposición, dedicación y esmero en la realización de esta investigación.

Ing. Edwin Santiago Escobar Rivas. Por sus observaciones en cada etapa del trabajo de graduación que fueron una guía para salir adelante a lo largo de toda la investigación.

Ing. José Mauricio Martínez García. Por su disposición en la organización de la investigación y proporcionarnos información vital para la conclusión del Modelo Hidrológico del Río Grande de San Miguel.

Ing. Roberto Adolfo Cerón Pineda. Por proponer el tema de investigación y aportar en gran medida al análisis de la problemática de inundaciones de la Laguna El Jocotal.

Al personal del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales:

Ing. Jorge Castaneda. Por su colaboración en el desarrollo del Modelo Hidrológico del Río Grande de San Miguel, así como en el análisis de los registros hidrométricos. Sus conocimientos aportados fueron invaluable para la investigación.

Ph.D.Lic. Enrique Barrasa. Por su intercesión ante las autoridades del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, para la aprobación del permiso para la recolección de datos en el Área Natural Protegida Laguna El Jocotal, y con ello dar inicio a la investigación.

Ing. Luís Ernesto Chipagua. Por su colaboración en la instalación del limnómetro en el muelle del caserío El Borbollón, su disposición a la realización de inspecciones técnicas en la laguna y proporcionarnos información necesaria para el desarrollo del Modelo Hidrológico del Río Grande de San Miguel.

Guarda recursos Leodán Ramírez. Por su colaboración en la recolección de datos batimétricos durante nuestra estadía en la Laguna El Jocotal y su completa disposición para realizar las observaciones y registros limnimétricos de la laguna, y un aforo en el Río El Desagüe, sin los cuales no se habría logrado completar el Modelo Hidrológico del Río Grande de San Miguel.

Guarda recursos Miguel López, Amílcar López e Isidro Flores. Por proporcionar información histórica de la Laguna El Jocotal y su colaboración en la campaña de recolección de datos batimétricos y de secciones del Río Grande de San Miguel.

Ing. Edgar Carías. Por dar su aprobación para la recolección de datos en el Área Natural Protegida Laguna El Jocotal.

Ing. Sergio Fuentes. Por colaborar en la campaña de levantamiento de secciones en el Río Grande de San Miguel.

Ing. Deysi López. Por dar su aprobación para poder utilizar la base de datos meteorológica e hidrométrica de la Dirección General del Observatorio Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Elizander Valle y Víctor Calero. Por su colaboración en la búsqueda y el análisis de información histórica de las estaciones hidrométricas y meteorológicas.

A nuestros familiares:

Luís Alberto Cornejo Herrera. Por su apoyo y completa disposición para brindarnos transporte hacia la Laguna El Jocotal en todo momento, principalmente durante la campaña de recolección de datos.

María Victoria Hernández de Cornejo. Por su apoyo en la logística para organizar las ponencias de la investigación.

Osmin Córdoba Cuellar. Por su colaboración en el diseño y construcción del limnómetro preliminar instalado en el muelle del caserío El Borbollón.

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso que me permitió culminar mis estudios y especialmente esta investigación tan larga y compleja, sin su iluminación y sin las capacidades que implantó en mí, no habría podido llegar tan lejos. ¡Gracias mi Dios!

A mi padre Luís Alberto Cornejo Herrera y a mi madre María Victoria Hernández de Cornejo por haberme brindado el estudio y facilitarme todo lo necesario para salir adelante a lo largo de toda esta etapa de mi vida, gracias por todo lo que me han dado, los amo mucho.

A John Ronald Reuel Tolkien, Shigeru Miyamoto, John Carmack, John Romero y David Dienstbier, ya que sin lugar a dudas sus historias, personajes, mundos, armas, criaturas, en fin todas sus creaciones, me mantuvieron completamente lejos del estrés a lo largo de estos casi dos años de investigación, diseño y cálculos interminables, muchas gracias.

A Gandalf, la Comunidad del Anillo y a todos aquellos involucrados en evitar que Sauron sumergiera a La Tierra Media en una nueva oscuridad, ya que sin sus proezas, esta investigación jamás habría visto la luz del día.

GUILLERMO ARTURO CORNEJO HERNÁNDEZ

Dedico la culminación de esta investigación a todas aquellas personas que contribuyeron en su desarrollo, ya que sin su aporte no se habría logrado.

Pero especialmente Quiero dedicar a mis padres, no solo la terminación de este trabajo, sino la culminación de mi carrera, este esfuerzo de tantos años que gracias a su apoyo incondicional ahora se convierte en realidad. GRACIAS, Ana Meléndez de Córdova y Osmín Córdova Cuellar.

Por último a todos mis amigos que me dieron ánimos en esos momentos cuando los corolarios de la ley de Murphy tomaban validez y todos los caminos parecían cerrarse. Muchas gracias por su apoyo, siempre es de mucha ayuda para poder ver las cosas con un mejor enfoque.

OSMIN ERNESTO CÓRDOVA MELÉNDEZ.

ÍNDICE

1. CAPÍTULO 1 – GENERALIDADES	16
1.1. Antecedentes	17
1.2. Planteamiento del problema	18
1.3. Objetivos	19
1.4. Alcances	20
1.5. Limitaciones	21
1.6. Justificación.....	21
2. CAPÍTULO 2 – MARCO TEÓRICO.....	22
2.1. Introducción.....	23
2.2. Conceptos generales de Hidrología de Superficie.	23
2.2.1. El Ciclo Hidrológico.....	23
2.2.2. Cuenca.....	24
2.2.3. Características Principales de las Cuencas y los Cauces	25
2.3. Modelación Hidrológica	33
2.3.1. Concepto de Sistema	33
2.3.2. Sistema Hidrológico	35
2.3.3. Modelo HBV/IHMS.....	35
2.3.3.1. Funcionamiento del modelo HBV	36
2.4. Balance Hídrico.	43
2.4.1. ¿Qué es el Balance Hídrico?.....	43
2.4.2. Objetivos e importancia de los estudios del Balance Hídrico.....	43
2.4.3. Ecuación del Balance Hídrico.	43
2.4.4. Cálculo de los componentes del Balance Hídrico.	44
2.4.4.1. Precipitación.	44
2.4.4.2. Infiltración.....	50
2.4.4.3. Escurrimiento.....	53

2.4.4.4. Evaporación y Evapotranspiración.....	56
3. CAPÍTULO 3 – INFLUENCIA DE LA LAGUNA EL JOCOTAL EN LAS AVENIDAS DEL RÍO GRANDE DE SAN MIGUEL	60
3.1. Introducción.....	61
3.2. Cronología de la formación del cauce La Rotura.	61
3.3. Hidrografía de la Laguna El Jocotal.	65
3.3.1. Afluentes.....	67
3.3.2. Efluentes.	72
3.3.3. Batimetría de la Laguna El Jocotal.	77
3.3.3.1. Punto con elevación fija e instalación de limnómetro.....	79
3.3.3.2. Grilla batimétrica	80
3.3.3.3. Mapas batimétricos.	81
3.4. Influencia de la Laguna El Jocotal en el tránsito de avenidas del RGSM	84
3.4.1. Análisis de caudales promedio diarios históricos.	86
3.4.2. Análisis del registro de niveles de las estaciones actuales.	104
3.4.2.1. Relación de niveles máximos y de tiempo de tránsito: Villerías – El Delirio y Villerías – La Canoa.	106
3.4.2.2. Relación de niveles máximos y de tiempo de tránsito El Delirio – Vado Marín y La Canoa – Vado Marín.	113
3.4.3. Análisis del Índice de Sinuosidad	124
3.5. Conclusiones del capítulo.	128
4. CAPÍTULO 4 – MODELO HIDROLÓGICO	130
4.1. Introducción.....	131
4.2. Registros meteorológicos e hidrométricos.....	131
4.3. Elaboración del Modelo Hidrológico del Río Grande de San Miguel	134
4.3.1. Parámetros geográficos de la cuenca del RGSM.	134
4.3.2. Conexiones entre subcuencas.	136
4.3.3. Tablas de ramificación de caudal (Branch Table).	138
4.3.4. Curvas Nivel – Almacenamiento.	144
4.3.5. Curvas Nivel – Descarga.....	148

4.3.6.	Estimación del caudal de los manantiales que alimentan la Laguna El Jocotal.	155
4.3.7.	Varianza explicada.	156
4.4.	Escenarios de modelación.	157
4.5.	Conclusiones del capítulo.	166
5.	CAPÍTULO 5 – BALANCE HÍDRICO	167
5.1.	Delimitación de la cuenca.	168
5.2.	Componentes del Balance Hídrico	169
5.2.1.	Precipitación (P)	169
5.2.2.	Evapotranspiración + Evaporación (E)	172
5.2.2.1.	Evapotranspiración Real sobre la cuenca.	174
5.2.2.2.	Evaporación en cuerpos de agua y zonas urbanas.	177
5.2.3.	Caudal subterráneo de entrada (Q_{UI})	178
5.2.3.1.	Cálculo del método RAS.	178
5.2.3.2.	Manantiales subterráneos	179
5.2.4.	Extracciones	179
5.2.5.	Caudal superficial de entrada (Q_{SI})	183
5.2.6.	Caudal superficial de salida (Q_{SO})	184
5.3.	Cálculo del Balance Hídrico.	184
6.	CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	187
6.1.	Conclusiones	188
6.2.	Recomendaciones	191
7.	BIBLIOGRAFÍA	192
8.	ANEXOS	195
8.1.	Anexos del capítulo 3	196
8.2.	Anexos del capítulo 4	216
8.3.	Anexos del capítulo 5	226
9.	GLOSARIO DE TÉRMINOS.	251

Índice de imágenes.

Imagen 2-1 El Ciclo Hidrológico	24
Imagen 2-2 Características principales de las cuencas y los cauces.....	26
Imagen 2-3 Orden de una Cuenca Hidrológica.....	28
Imagen 2-4 Pendiente media.....	29
Imagen 2-5 Pendiente compensada.....	29
Imagen 2-6 Pendiente por secciones.....	30
Imagen 2-7 Clasificación de las corrientes por el tiempo en que transportan agua.....	31
Imagen 2-8 Clasificación de las corrientes por su posición geográfica o edad geológica.....	31
Imagen 2-9 Tiempo de concentración.....	32
Imagen 2-10 Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global.....	34
Imagen 2-11 Representación esquemática de la operación de un sistema.....	35
Imagen 2-12 Esquema del funcionamiento del modelo HBV.....	36
Imagen 2-13 Esquema de la subrutina de precipitación.....	37
Imagen 2-14 Esquema de la subrutina de humedad del suelo.....	38
Imagen 2-15 Variación de la humedad del suelo.....	39
Imagen 2-16 Esquema de la función de respuesta.....	40
Imagen 2-17 Variación del caudal en el depósito superior e inferior.....	41
Imagen 2-18 Esquema de la función de transformación.....	42
Imagen 2-19 Generación del hidrograma a través de la función de transformación.....	42
Imagen 2-20 Deducción de datos faltantes.....	46
Imagen 2-21 Polígonos de Thiessen.....	48
Imagen 2-22 Curvas isoyetas.....	49
Imagen 2-23 Aforo por el método de la relación Sección - Velocidad.....	55
Imagen 2-24 Evaporímetro Clase A.....	57
Imagen 3-1 Hidrografía de la Laguna El Jocotal según los cuadrantes.....	62
Imagen 3-2 Modificación de la hidrografía histórica causada por el cauce La Rotura.....	63
Imagen 3-3 Formación histórica del cauce La Rotura.....	64
Imagen 3-4 Microcuencas Laguna El Jocotal.....	66
Imagen 3-5 Ubicación de los manantiales.....	67
Imagen 3-6 Zona de manantiales.....	68
Imagen 3-7 Poza Azul.....	68
Imagen 3-8 La Remolacha.....	69
Imagen 3-9 Manantiales externos.....	69
Imagen 3-10 Cauce La Rotura.....	70
Imagen 3-11 Imagen satelital del cauce La Rotura.....	71
Imagen 3-12 Río El Desagüe y Desagües formados 1, 2 y 3.....	72
Imagen 3-13 Río El Desagüe.....	73

Imagen 3-14 Muros de retención principales ubicados en Río El Desagüe.....	74
Imagen 3-15 Muros de retención secundarios ubicados en Desagüe formado 1.....	75
Imagen 3-16 Desagüe natural.....	76
Imagen 3-17 Profundidad máxima y columna de agua para un punto de sondeo batimétrico..	77
Imagen 3-18 Equipo utilizado en la batimetría y ejemplo de sondeo.....	78
Imagen 3-19 Limnómetro de la Laguna El Jocotal.....	79
Imagen 3-20 Grilla batimétrica.....	80
Imagen 3-21 Batimetría del fondo de la Laguna El Jocotal.....	81
Imagen 3-22 Batimetría estimada para el año 2000.....	82
Imagen 3-23 Batimetría del año 2012.....	83
Imagen 3-24 Estaciones hidrométricas en el Río Grande de San Miguel.....	85
Imagen 3-25 Variables a considerar para obtener las relaciones de nivel máximo y tiempo de tránsito.....	105
Imagen 3-26 Ubicación de las estaciones Villerías, El Delirio y La Canoa.....	106
Imagen 3-27 Ubicación de las estaciones El Delirio, La Canoa y Vado Marín.....	113
Imagen 3-28 Esquema de Nivel base, Nivel de inicio y Tendencia del río.....	122
Imagen 3-29 Componentes del cálculo del Índice de Sinuosidad.....	125
Imagen 3-30 Trazado del cauce del RGSM y su eje de meandros.....	126
Imagen 4-1 Ubicación de las estaciones utilizadas en el Modelo Hidrológico del RGSM.....	133
Imagen 4-2 Subcuencas del Modelo Hidrológico del RGSM.....	135
Imagen 4-3 Esquema de las conexiones entre las subcuencas del Modelo Hidrológico del RGSM.....	136
Imagen 4-4 Relación entre Q.Total, Q.Main y Q.Branch.....	138
Imagen 4-5 Esquema de la relación entre Q.Marín, Q.Canoa, Q.Main y QBranch.....	139
Imagen 4-6 Esquema de la planicie de inundación en la tabla de ramificación de caudal.....	142
Imagen 4-7 Curvas de nivel resultantes de la digitalización de los cuadrantes.....	145
Imagen 4-8 Curvas de almacenamiento. Laguna El Jocotal.....	147
Imagen 4-9 Puntos de aforo en Río El Desagüe y cauce La Rotura.....	148
Imagen 4-10 Esquema de un vertedero. Software Hcanales 3.0.....	158
Imagen 4-11 Esquema de las variables de los escenarios modelados.....	160
Imagen 5-1 Subcuenca de la Laguna El Jocotal.....	168

Índice de Gráficas.

Gráfica 3-1 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, mayo 1978-1979.....	87
Gráfica 3-2 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, junio 1978-1979.....	88
Gráfica 3-3 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, julio 1978-1979.....	89
Gráfica 3-4 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, agosto 1978-1979.....	90
Gráfica 3-5 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, septiembre 1978-1979.....	91

Gráfica 3-6 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, octubre 1978-1979.....	92
Gráfica 3-7 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, noviembre 1978-1979.....	93
Gráfica 3-8 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, diciembre 1978-1979.....	94
Gráfica 3-9 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, enero 1978-1979.....	95
Gráfica 3-10 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, febrero 1978-1979.....	96
Gráfica 3-11 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, marzo 1978-1979.....	97
Gráfica 3-12 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, abril 1978-1979.....	98
Gráfica 3-13 Curva de descarga Estación La Canoa 1977-1978.....	103
Gráfica 3-14 Sección del Río Grande de San Miguel aguas arriba de La Rotura.....	104
Gráfica 3-15 Registro de niveles Villerías – El Delirio 2006.....	107
Gráfica 3-16 Relación de niveles máximos Villerías – El Delirio 2006.....	108
Gráfica 3-17 Relación de Tiempo de transito Villerías – El Delirio 2006.....	109
Gráfica 3-18 Registro de niveles Villerías – La Canoa 2012.....	110
Gráfica 3-19 Relación de niveles máximos Villerías – La Canoa 2012.....	111
Gráfica 3-20 Relación de tiempo de transito Villerías – La Canoa 2012.....	112
Gráfica 3-21 Registro de niveles El Delirio – Vado Marín 2006.....	114
Gráfica 3-22 Registro de niveles 09-10 de Julio de 2006 El Delirio – Vado Marín.....	115
Gráfica 3-23 Relación de niveles máximos El Delirio – Vado Marín 2006.....	116
Gráfica 3-24 Relación de tiempo de tránsito El Delirio – Vado Marín 2006.....	117
Gráfica 3-25 Registro de niveles máximos y tiempo de tránsito La Canoa – Vado Marín 2012.....	118
Gráfica 3-26 Relación de niveles máximos La Canoa – Vado Marín.....	119
Gráfica 3-27 Relaciones Nivel – Tiempo de transito La Canoa – Vado Marín.....	121
Gráfica 3-28 Tiempo de tránsito - Nivel de crecida en La Canoa influenciada por el nivel del rio en Vado Marín.....	123
Gráfica 3-29 Comparación entre Índice de Sinuosidad y perfil del RGSM.....	127
Gráfica 4-1 Recesiones típicas de las lagunas: Olomega y El Jocotal.....	137
Gráfica 4-2 Q.Canoa - Diferencia (Q.Marín - Q.Canoa).....	140
Gráfica 4-3 Límite de desborde y de planicie.....	141
Gráfica 4-4 Estimación del caudal de desborde (Q.Branch).....	141
Gráfica 4-5 Curva de descarga bajo el nivel de los muros. Laguna El Jocotal.....	150
Gráfica 4-6 Perfil dela Laguna El Jocotal y Río El Desagüe en la zona de los muros norte.....	157
Gráfica 4-7 Curva de descarga teórica para simular el retiro de los muros en Laguna El Jocotal.	159
Gráfica 4-8 Modelación de los eventos máximos históricos que han afectado la Laguna El Jocotal.....	162
Gráfica 4-9 Simulación de la DT12E. Escenarios 1, 2 y 3.....	163
Gráfica 4-10 Simulación de la DT12E. Escenarios 4, 5 y 6.....	164
Gráfica 4-11 Simulación de la DT12E. Escenarios 1, 2, 3, 4, 5 y 6.....	165
Gráfica 5-1 Precipitación media mensual.....	171

Gráfica 5-2 Variación del almacenamiento en el acuífero.....	186
--	-----

Índice de Tablas.

Tabla 2-1 Velocidad media del flujo de un cauce según la pendiente.....	33
Tabla 2-2 Coeficientes topográficos utilizados en el Método RAS.	52
Tabla 2-3 Coeficientes vegetativos utilizados en el Método RAS.	52
Tabla 2-4 Coeficientes de texturas de suelos utilizados en el Método RAS.	52
Tabla 2-5 Factores de corrección de caudal para aforos con flotador.	56
Tabla 3-1 Información geodésica del mojón Merlos.	79
Tabla 3-2 Información geodésica del limnómetro de la Laguna El Jocotal.	79
Tabla 3-3 Características de la batimetría del fondo de la Laguna El Jocotal.....	81
Tabla 3-4 Características de la batimetría estimada para el año 2000.....	82
Tabla 3-5 Características de la batimetría del año 2012.....	83
Tabla 3-6 Estaciones hidrométricas en el RGSM.	84
Tabla 3-7 Límites para analizar las avenidas registradas en La Canoa y Vado Marín.....	86
Tabla 3-8 Relación de Máximos Caudales Promedios Diarios, La Canoa - Vado Marín 1977-1978.	99
Tabla 3-9 Relación de Máximos Caudales Promedios Diarios, La Canoa - Vado Marín 1978-1979.	100
Tabla 3-10 Relación de Máximos Caudales Promedios Diarios, La Canoa - Vado Marín 1979- 1980.	101
Tabla 3-11 Relación de Máximos Caudales Promedios Diarios, La Canoa - Vado Marín 1980- 1981.	102
Tabla 3-12 Características de los trazados de los ríos según su Índice de Sinuosidad.	124
Tabla 4-1 Registros disponibles para la elaboración del Modelo Hidrológico.....	131
Tabla 4-2 Estaciones utilizadas en el Modelo Hidrológico del RGSM.	132
Tabla 4-3 Áreas de las subcuencas del Modelo Hidrológico del RGSM.	134
Tabla 4-4 Qpd máximos La Canoa – Vado Marín 1978-1979.....	139
Tabla 4-5 Tabla de ramificación de caudal para estación La Canoa 1978-1979.	143
Tabla 4-6 Curvas de almacenamiento. Laguna El Jocotal	146
Tabla 4-7 Datos de aforos realizados.....	149
Tabla 4-8 Resultados de los aforos realizados.	150
Tabla 4-9 Descarga de la Laguna El Jocotal bajo el nivel de los muros.....	151
Tabla 4-10 Nivel máximo registrado en Vado Marín durante 1998 y 2011.....	152
Tabla 4-11 Puntos de dispersión para trazar la curva de descarga. Laguna El Jocotal	153
Tabla 4-12 Descarga de la Laguna El Jocotal sobre el nivel de los muros.....	154
Tabla 4-13 Estimación del caudal de los manantiales.	155
Tabla 4-14 Resultados de la calibración del Modelo Hidrológico del RGSM.	156

Tabla 4-15 Datos para simular el retiro de los muros norte y sur.	158
Tabla 4-16 Curva de descarga teórica para simular el retiro de los muros.	158
Tabla 4-17 Escenarios modelados.....	161
Tabla 4-18 Resultados de modelación del escenario natural durante los eventos máximos históricos.....	161
Tabla 5-1 Estaciones meteorológicas utilizadas para el periodo de estudio.....	169
Tabla 5-2 Precipitación media mensual.....	170
Tabla 5-3 Precipitación media sobre la cuenca de la Laguna El Jocotal.	172
Tabla 5-4 Ubicación de las estaciones para trazar las curvas de evapotranspiración.	172
Tabla 5-5 Evapotranspiración potencial media mensual 1970-2001.....	173
Tabla 5-6 Evapotranspiración potencial media sobre la cuenca de la Laguna El Jocotal.	173
Tabla 5-7 Evapotranspiración de cultivo mensual sobre la cuenca de la Laguna El Jocotal.....	174
Tabla 5-8 Capacidad de agua disponible por pie de profundidad, según la textura del suelo..	176
Tabla 5-9 Evapotranspiración real sobre la cuenca de la Laguna El Jocotal.	176
Tabla 5-10 Evaporación media sobre la cuenca de la Laguna El Jocotal.	177
Tabla 5-11 Recarga acuífera promedio mensual.	179
Tabla 5-12 Población de los municipios ubicados dentro de la cuenca de la Laguna El Jocotal.	180
Tabla 5-13 Cantones de la cuenca de la Laguna El Jocotal.	181
Tabla 5-14 Estimación de la población.	182
Tabla 5-15 Extracciones del acuífero.	182
Tabla 5-16 Extracción mensual promedio en Mm ³	183
Tabla 5-17 Caudal superficial de entrada, estación La Canoa (m ³ /s)	183
Tabla 5-18 Caudal superficial de salida, estación Vado Marín (m ³ /s).....	184
Tabla 5-19 Parámetros del Balance Hídrico.....	184
Tabla 5-20 Variación del área del espejo de agua de la laguna según la época del año.	185
Tabla 5-21 Parámetros del Balance Hídrico en Mm ³	185

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

La Laguna El Jocotal forma parte de la cuenca del Río Grande de San Miguel y se ubica en la jurisdicción de El Tránsito, a unos 20 kilómetros al Suroeste de la cabecera del departamento de San Miguel, se estableció como Área Natural Protegida en 1996, con una extensión de 1571ha, 89a y 19.17ca, según las mediciones del Instituto Geográfico Nacional (1993), las variaciones de su espejo de agua, oscilan de forma natural entre las 900ha en la época seca y las 1,800ha en la época lluviosa (Diario Oficial Tomo N°331, Decreto Legislativo N° 689, 1996).

Años atrás, la laguna se vio afectada por conflictos de intereses entre los pobladores de los caseríos aledaños y los propietarios de las tierras circundantes; ya que estos últimos, realizaron acciones con el fin de secarla y utilizar las tierras drenadas para la producción agrícola y ganadera, siendo la medida más drástica, la apertura y construcción de un canal de desagüe artificial hacia el Río Grande de San Miguel. Esta iniciativa fue detenida con el apoyo del Servicio de Parques Nacionales y Vida Silvestre y la participación de las comunidades de la zona (Convención RAMSAR, Ficha técnica Laguna El Jocotal, 1997).

Durante la época seca la Laguna recibe el caudal de los manantiales subterráneos ubicados al sur del volcán Chaparrastique, y en época de lluvias, también capta más agua por escorrentía superficial, directamente de los cauces de las quebradas Lecho Seco y Calle Nueva (Descripción de Lagunas de El Salvador, OIRSA, p22).

Según los Guardarecursos destacados en la laguna, los eventos meteorológicos más destructivos que han afectado al país en la última década, como el huracán Stan en octubre de 2005, la Tormenta Tropical Agatha en mayo de 2010 y la Depresión Tropical 12-E, en octubre de 2011, han provocado fuertes inundaciones en la zona; sin embargo, éstas no han superado el máximo nivel histórico registrado, causado por el huracán Mitch en noviembre de 1998.

La importancia que tiene esta Laguna a nivel internacional, quedó demostrada al ser declarada como sitio RAMSAR el 12 de Marzo de 1997. (Diario Oficial Tomo N°341, Acuerdo Ejecutivo N°535 y Decreto Legislativo 341, 1998).

1.2. Planteamiento del problema

La laguna El Jocotal es un cuerpo de agua, que presenta variaciones en sus niveles debido principalmente a los eventos meteorológicos que se desarrollan durante la época lluviosa, sin embargo la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), tiene conocimiento de un comportamiento atípico, que consiste en un incremento de nivel de sus aguas “sin causas aparentes”, generando con esto inundaciones en sus zonas aledañas¹.

Además, se tiene conocimiento que la laguna actualmente está presentando un azolvamiento acelerado, que degrada su área natural protegida y todos los ecosistemas asociados a ella, afectando a las especies que la utilizan en su migración y a las que la habitan, especialmente a las acuáticas ya que el azolvamiento reduce las áreas en las que estas especies pueden sobrevivir².

¹ Entrevista con el Ingeniero Roberto Cerón, Hidrólogo Pronosticador, de la DGOA/MARN, sobre la Problemática de inundaciones en la Laguna El Jocotal, San Salvador, Septiembre de 2011.

² Entrevista con la Licenciada Norma Cerón, Bióloga Consultora, MARN, sobre la Problemática de inundaciones en la Laguna El Jocotal. San Salvador, Septiembre de 2011.

1.3. Objetivos

General:

- Determinar las causas que producen la problemática de inundaciones en la Laguna El Jocotal.

Específicos:

- Determinar cómo el Río Grande de San Miguel influye en los niveles de la Laguna El Jocotal.
- Determinar la frecuencia en que se han presentado las inundaciones de la laguna y los períodos en que han ocurrido con mayor intensidad.
- Calcular el balance hídrico del acuífero de la Laguna El Jocotal.

1.4. Alcances

- Realizar la batimetría de la Laguna El Jocotal.
- Utilizar el método de la ecuación de continuidad para calcular el Balance Hídrico.
- Elaborar el Modelo Hidrológico de la laguna, para definir su comportamiento ante escenarios que varíen los caudales que aporta el Río Grande de San Miguel, y los caudales que descarga la laguna a través del Río El Desagüe.
- Obtener los mapas de inundación de los eventos extremos según las cotas obtenidas de las modelaciones hidrológicas.

1.5. Limitaciones

- No existe ningún estudio que haya analizado con anterioridad las inundaciones causadas por la Laguna El Jocotal.
- Disponibilidad de registros: no se tienen registros de niveles recientes de la Laguna de Olomega, y ningún registro de la Laguna El Jocotal; además, a ninguno de los registros de las estaciones hidrométricas de la última década se les ha aplicado control de calidad.
- Período para realizar batimetría: solo en época seca por las condiciones de accesibilidad a la laguna.

1.6. Justificación

En las últimas décadas las comunidades alrededor de la Laguna El Jocotal han sufrido de inundaciones año tras año, debido al incremento de los niveles de la laguna durante la época lluviosa, viéndose afectados en sus actividades de subsistencia diaria, como la pesca, la cría de ganado, la siembra y en su modo de vida en general; es por esto que la Dirección General del Observatorio Ambiental del MARN, para hacer más eficiente su trabajo en conjunto con La Dirección General de Protección Civil, necesita conocer las causas que generan las inundaciones y el comportamiento de las mismas, para informar y resguardar a tiempo, las comunidades que se ven afectadas.

No obstante, las inundaciones no solo afectan a las comunidades, sino también a la laguna en sí, pues se ha detectado un problema de contaminación y azolvamiento que afecta negativamente al cuerpo de agua, ya que disminuye la capacidad de captación de la laguna y por ende el espacio vital para las especies que la habitan.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción.

El presente capítulo se constituye de tres partes principales, en la primera, se consideran algunas de las nociones básicas que se deben de tener en cuenta para el desarrollo de un Estudio Hidrológico; en la segunda, se define el concepto de Modelación Hidrológica, los distintos tipos que existen y las variables que se aplican a cada uno de ellos; finalmente, en la tercera parte se explica el concepto de Balance Hídrico para una cuenca, su importancia y los componentes principales que se toman en cuenta para realizarlo. Lo anterior, con el fin de proporcionar los conocimientos a nivel teórico sobre la terminología y los conceptos utilizados en el presente trabajo de investigación.

2.2. Conceptos generales de Hidrología de Superficie.

2.2.1. El Ciclo Hidrológico.

El Ciclo Hidrológico se considera el concepto fundamental de la Hidrología. De las muchas representaciones que se pueden hacer de él, la más ilustrativa es quizás la descriptiva.

Como todo ciclo, el Ciclo Hidrológico puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua que así se forma se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada y una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie se evapora nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas, y posteriormente, es transpirada casi en su totalidad hacia la atmosfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo (percolación) para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar. (Ven Te Chow, 1964)

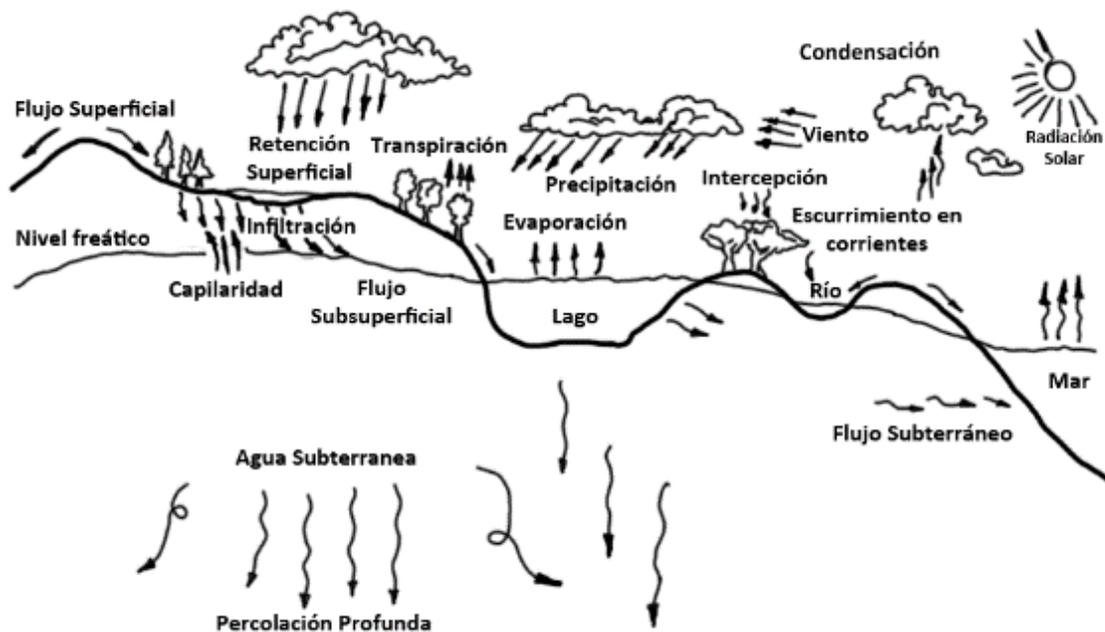


Imagen 2-1 El Ciclo Hidrológico

2.2.2. Cuenca.

Una Cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde, si fuera impermeable, las gotas de lluvia que caen sobre ella, tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

La definición anterior se refiere a una cuenca superficial; asociada a cada una de éstas existe también una cuenca subterránea, cuya forma en planta es semejante. De ahí la aclaración de que la definición es válida si la superficie fuera impermeable.

Desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: Endorreicas y Exorreicas. En las primeras el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago; en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o el mar. (Francisco Javier Aparicio Mijares, 1989)

2.2.3. Características Principales de las Cuencas y los Cauces

Régimen fluvial.

En latitudes medias, los ríos obtienen el agua principalmente de las lluvias, además de los aportes de las aguas subterráneas. Su régimen de alimentación se establece a partir de los valores de caudal, es decir, la cantidad de agua que pasa por una sección del río, expresada en unidades de volumen (litros, metros cúbicos, etc.) por unidad de tiempo (segundos, minutos, etc.).

Los resultados generan hidrogramas, que muestran la distribución mensual del gasto o caudal del río. Esta labor es de vital importancia, porque nos permite conocer el comportamiento anual de los ríos, y con ello realizar un trabajo planificado con el agua disponible en el tiempo y, además, prever y manejar situaciones de riesgo, como las crecidas o periodos de prolongada sequía.

En latitudes medias, los ríos pueden tener los siguientes tipos de Régimen:

1. Régimen Pluvial: Se trata de ríos que tienen su alimentación fundamental en las lluvias. Las crecidas y estiajes (menor volumen de agua durante el año) están en directa relación con el régimen de precipitaciones del lugar.
2. Régimen Lacustre: Los ríos que corresponden a este régimen de alimentación se caracterizan porque sus cursos de agua nacen del desagüe de un lago.
3. Régimen Mixto: Son ríos que le corresponden la superposición de dos regímenes simples. (Sala de historia, s.f.)

Parteaguas.

Es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas (véase Imagen 2-2)

Área de la cuenca.

Se define como la superficie, en proyección horizontal determinada por el Parteaguas

(véase Imagen 2-2)

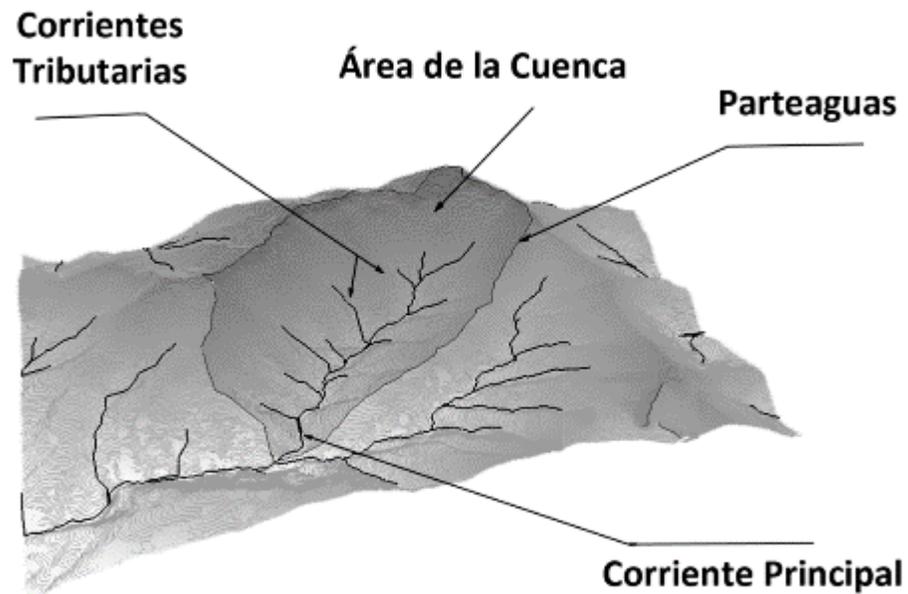


Imagen 2-2 Características principales de las cuencas y los cauces.

Corriente Principal (Cauce más Largo).

En una cuenca, es la corriente que pasa por la salida de la misma y en algunos cálculos hidrológicos coincide con el Cauce más Largo. Nótese que esta definición se aplica solamente a las cuencas Exorreicas. Las demás corrientes de una cuenca de este tipo se denominan corrientes tributarias.

Todo punto de cualquier corriente tiene una cuenca de aportación, toda cuenca tiene una y sólo una corriente principal. Las cuencas correspondientes a las corrientes tributarias o a los puntos de salida, se llaman cuencas tributarias o subcuencas. Entre más corrientes tributarias tenga una cuenca, es decir, entre mayor sea el grado de bifurcación de su sistema de drenaje, más rápida será su respuesta a la precipitación.

Para su determinación y análisis, se han propuesto un cierto número de indicadores de dicho grado de bifurcación, algunos de los cuales son los siguientes:

- Orden de las Corrientes.

Una corriente de orden 1 es un tributario sin ramificaciones, una corriente de orden 2 tiene sólo tributarios de orden 1, etc. Dos corrientes de orden 1 forman una de orden 2, dos corrientes de orden 3 forman una de orden 4, etc. Pero por ejemplo una corriente de orden 2 y una de orden 3 forman otra de orden 3. El orden de una cuenca es el mismo que el de la corriente principal en su salida; así, por ejemplo, el orden de la cuenca de la Imagen 2-3 Orden de una Cuenca Hidrológica. es 2. Nótese que el orden de una cuenca depende en mucho de la escala del plano utilizado para su determinación; en este sentido, las comparaciones entre una cuenca y otra deben hacerse con cuidado, especialmente cuando los planos correspondientes no están a la misma escala o están editados por diferentes organismos.

- Densidad de Corrientes y Densidad de Drenaje.

Otros indicadores del grado de bifurcación o eficiencia de una cuenca, son la Densidad de Corrientes (D_s), definida como el número de corrientes permanentes e intermitentes por unidad de área y la Densidad de Drenaje (D_d), definida como la longitud de las corrientes por unidad de área.

Ecuación 2.1

$$D_s = \frac{N_s}{A}$$

Ecuación 2.2

$$D_d = \frac{L_s}{A}$$

Dónde: N_s = número de corrientes permanentes e intermitentes.

L_s = longitud total de las corrientes.

A = área de la cuenca.

Un orden de corriente alto o una densidad elevada refleja una cuenca altamente disectada, que responde rápidamente a una tormenta. Las densidades u órdenes de corrientes pequeñas se observan donde los suelos son muy resistentes a la erosión o muy permeables; donde estos indicadores son elevados, los suelos se erosionan fácilmente o son relativamente impermeables, las pendientes son altas y la cobertura vegetal es escasa.

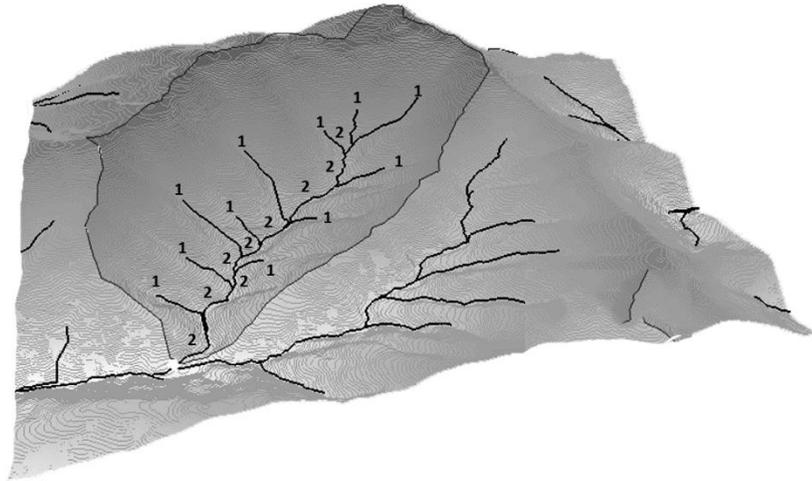


Imagen 2-3 Orden de una Cuenca Hidrológica.

Pendiente Media del Cauce.

Uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta es la pendiente del cauce principal. Dado que ésta pendiente varia a lo largo del cauce, es necesario definir una pendiente media; para ello existen varios métodos, de los cuales se mencionan tres:

- a) La Pendiente Media es igual al desnivel entre los extremos de la corriente dividido entre su longitud medida en planta (véase Imagen 2-4).
- b) La Pendiente Media es la de una línea recta que, apoyándose en el extremo aguas abajo de la corriente, hace que se tengan áreas iguales arriba y debajo de dicha línea (véase Imagen 2-5).
- c) Taylor y Schwarz proponen calcular la pendiente media como la de un canal de sección transversal uniforme, que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido que la corriente en cuestión (Imagen 2-6), utilizando para ello la siguiente formula.

Ecuación 2.3

$$S = \left[\frac{m}{\frac{l_1}{\sqrt{s_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{s_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{s_m}}} \right]^2$$

Donde:

S = pendiente media de la cuenca

m = número de tramos en que se divide el cauce

l_i = longitud de cada tramo

S_i = pendiente de cada tramo

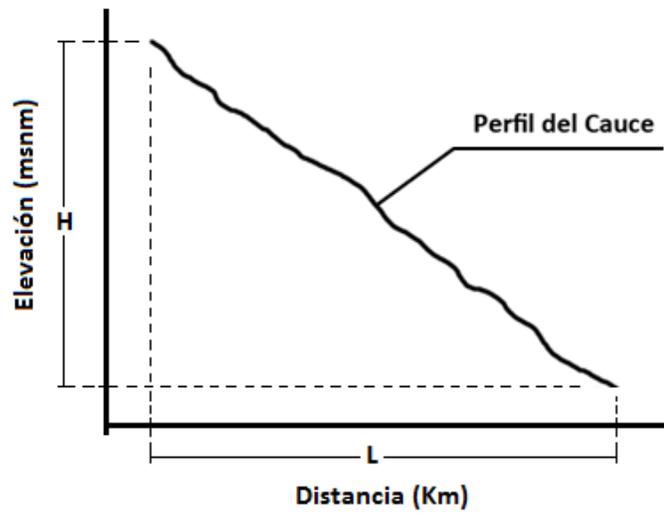


Imagen 2-4 Pendiente media.

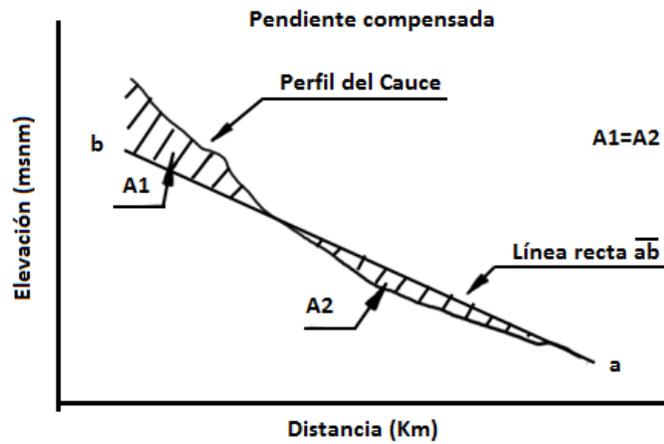


Imagen 2-5 Pendiente compensada.

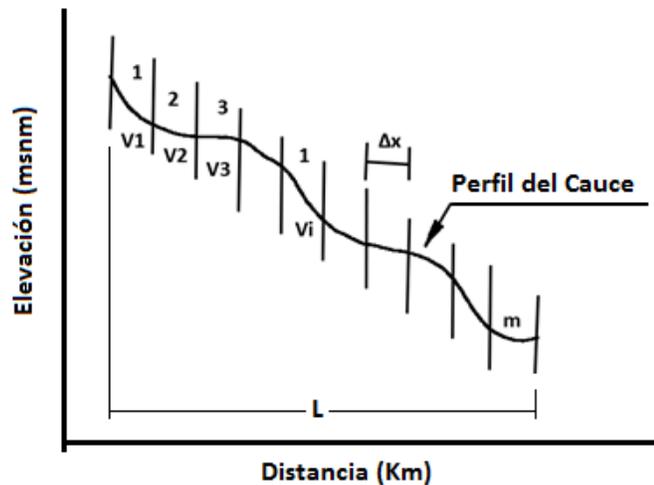


Imagen 2-6 Pendiente por secciones.

(Francisco Javier Aparicio Mijares, 1989)

Clasificación de las corrientes:

Las corrientes se clasifican de varias maneras, pero las más interesantes en la ingeniería hidrológica son tal vez las siguientes:

- Por el tiempo que transportan agua:

Según esta clasificación las corrientes pueden ser permanentes, intermitentes, o efímeras (véase Imagen 2-7).

En una corriente permanente el punto más bajo del cauce se encuentra siempre abajo del nivel de aguas freáticas. Estas corrientes transportan agua durante todo el año y siempre están alimentadas, totalmente o en parte, por el agua subterránea, es decir, son efluentes (Imagen 2-7a). Una corriente intermitente transporta agua durante la época de lluvias de cada año, cuando el nivel freático asciende hasta quedar por encima del punto A. (Imagen 2-7b) en época de secas el nivel freático queda por debajo de dicho punto y la corriente no transporta agua, salvo cuando se presenta una tormenta. En el caso de las corrientes efímeras o influentes el nivel freático está siempre por debajo del punto A (Imagen 2-7c) y transportan agua inmediatamente después de una tormenta, y, en este caso, alimentan a los almacenamientos de agua subterránea.

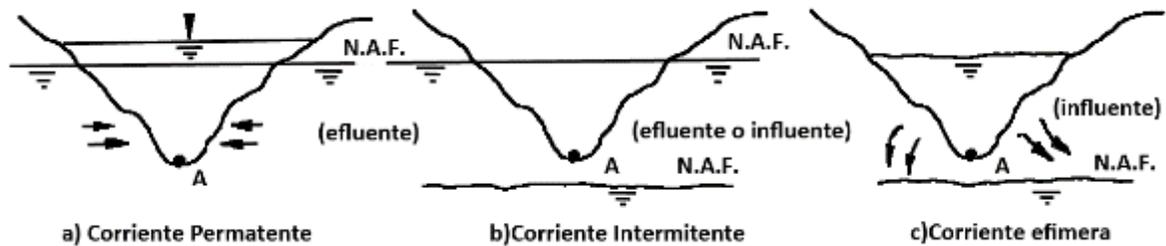


Imagen 2-7 Clasificación de las corrientes por el tiempo en que transportan agua.

- Por su posición topográfica o edad geológica.

De acuerdo con esta clasificación los ríos pueden ser de montaña o juveniles, de transición o maduros, o bien de planicie o viejos (véase Imagen 2-8).

En un mismo cauce se pueden encontrar los tres tipos de ríos. Los ríos de montaña, característicos de cotas elevadas sobre el nivel del mar, tienen grandes pendientes y pocas curvas y, debido a las grandes velocidades que alcanza el agua, sus cauces están generalmente formados por cantos rodados con un poco de grava y casi nada de finos. Los ríos de planicie, por el contrario, presentan numerosos meandros debido a las bajas velocidades del agua y su cauce se forma por arenas y finos. En general, estos ríos se encuentran en cotas cercanas al nivel del mar. Los ríos de transición están en una situación intermedia entre los dos anteriores: presentan algunas curvas, con velocidades de agua moderadas y sus cauces están formados básicamente por grava, con algo de cantos rodados y arena. (Francisco Javier Aparicio Mijares, 1989)

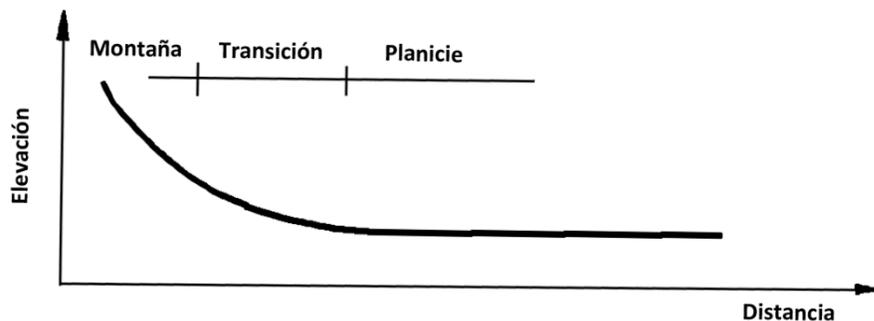


Imagen 2-8 Clasificación de las corrientes por su posición geográfica o edad geológica.

Tiempo de concentración (t_c):

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.

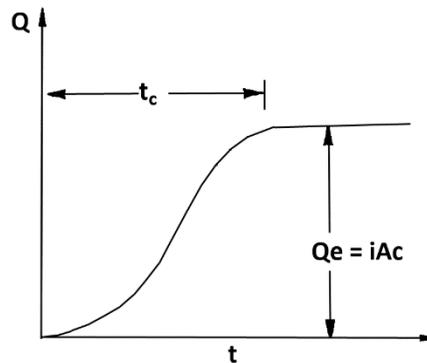


Imagen 2-9 Tiempo de concentración.

El tiempo de concentración t_c 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 y los cauces, y de la rugosidad de la superficie de los mismos. El tiempo de concentración se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 2.4

$$t_c = \frac{L}{3600v}$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración en horas.

L = Longitud del cauce principal de la cuenca en metros.

v = Velocidad media del agua en el cauce principal en m/s. La velocidad media v se estima con las siguientes tablas.

Tabla 2-1 Velocidad media del flujo de un cauce según la pendiente.

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

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

Ecuación 2.5

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.27}}{S^{0.385}}$$

Donde:

S = Pendiente del cauce principal.

L = Longitud del cauce principal expresada en metros.

t_c = Tiempo de concentración en horas.

2.3. Modelación Hidrológica

2.3.1. Concepto de Sistema

Un sistema es un conjunto de partes conectadas entre sí, que forman un todo. El Ciclo Hidrológico puede tratarse como un Sistema cuyos componentes son precipitación, evaporación, escorrentía y otras fases del Ciclo Hidrológico. Estos componentes pueden agruparse en subsistemas, que pueden analizarse separadamente y combinarse sus resultados de acuerdo con las interacciones entre ellos para analizar el sistema total.

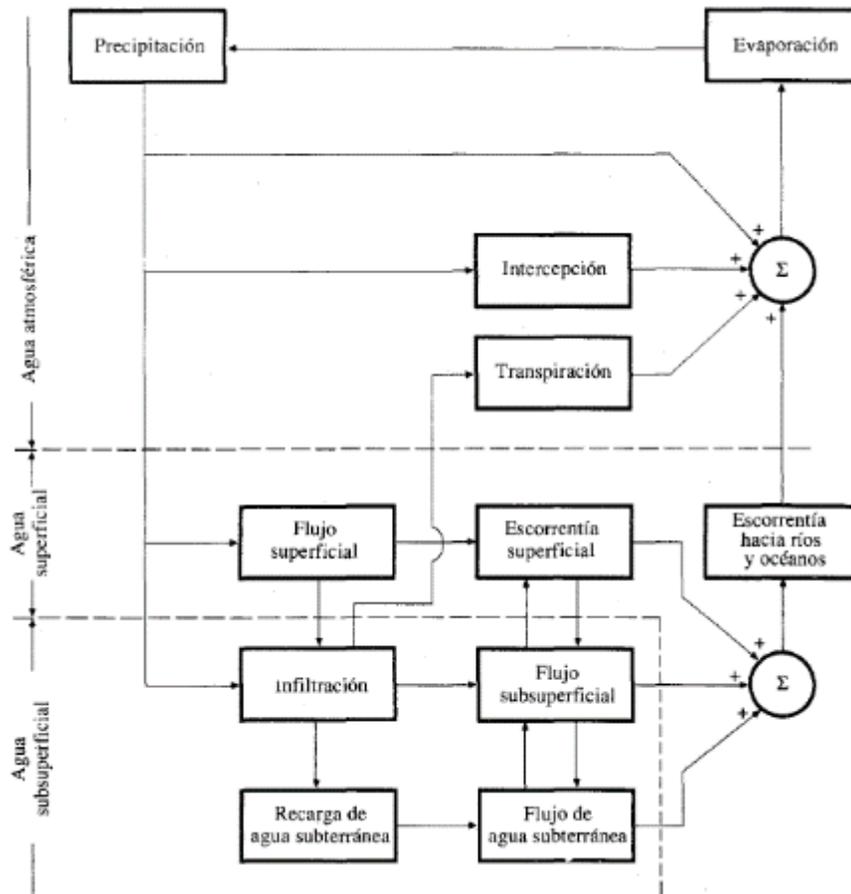


Imagen 2-10 Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global.

En la Imagen 2-10, el Ciclo Hidrológico global se representa como un Sistema. Las líneas punteadas lo dividen en tres subsistemas: el *sistema de agua atmosférica* contiene los procesos de precipitación, evaporación, intercepción y transpiración; el *sistema de agua superficial* contiene los procesos de flujo superficial, escorrentía superficial, nacimientos de agua subsuperficial y subterránea, y escorrentía hacia ríos y océanos; y el *sistema de agua subsuperficial* contiene los procesos de infiltración, recarga de acuífero, flujo subsuperficial y flujo de agua subterránea. El flujo subsuperficial ocurre en la capa del suelo cercana a la superficie; el flujo de agua subterránea, en estratos profundos de suelo o roca. (Ven Te Chow, 1964)

2.3.2. Sistema Hidrológico

Un Sistema Hidrológico se define como una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas.

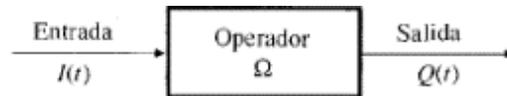


Imagen 2-11 Representación esquemática de la operación de un sistema.

El objetivo del análisis del Sistema Hidrológico es estudiar la operación del sistema y predecir su salida. Un modelo de Sistema Hidrológico es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas.

El análisis estadístico cumple un papel importante en el análisis de Sistemas Hidrológicos, porque su mayor entrada es la precipitación, un fenómeno altamente variable e impredecible. (Ven Te Chow, 1964)

2.3.3. Modelo HBV/IHMS.

El Modelo Hydrologiska Byråns Vattenbalans (HBV) es un sistema computarizado para el cálculo hidrológico, desarrollado en Suecia por el Instituto Hidráulico Sueco (SMHI) en 1971.

El HBV es un modelo determinístico que para nuestras latitudes no precisa de una gran variedad de parámetros para su cálculo, básicamente los datos diarios de precipitación y estimaciones de evapotranspiración potencial. Esto es una de sus grandes ventajas, ya que al utilizar información de la red meteorológica, se evita el déficit de datos que usualmente presentan las redes hidrológicas por su menor densidad de estaciones.

Se ha demostrado que este modelo es adecuado para ser aplicado en cuencas hidrográficas de régimen tropical y de montaña con áreas de drenaje entre 100 y 5000 Km². (Jorge Antonio Castaneda Cerón, 2010)

2.3.3.1. Funcionamiento del modelo HBV

El modelo consiste en subrutinas para la acumulación de nieve y derretimiento, un proceso para el cálculo de la humedad del suelo, rutinas para la generación de la escorrentía y finalmente, un proceso sencillo de enrutamiento. La información que requiere el modelo es:

- Datos registrados de precipitación (lluvia o nieve)
- Temperatura del aire
- Presión de vapor
- Velocidad del viento
- Datos estimados de evaporación
- Valores promedio mensuales de evapotranspiración.

De todos estos, La temperatura del aire, presión de vapor y velocidad del viento son usados para calcular la acumulación y derretimiento de la nieve. Las descargas registradas en estaciones hidrométricas son usadas para calibrar el modelo y para corregir y verificar el modelo antes de un pronóstico.

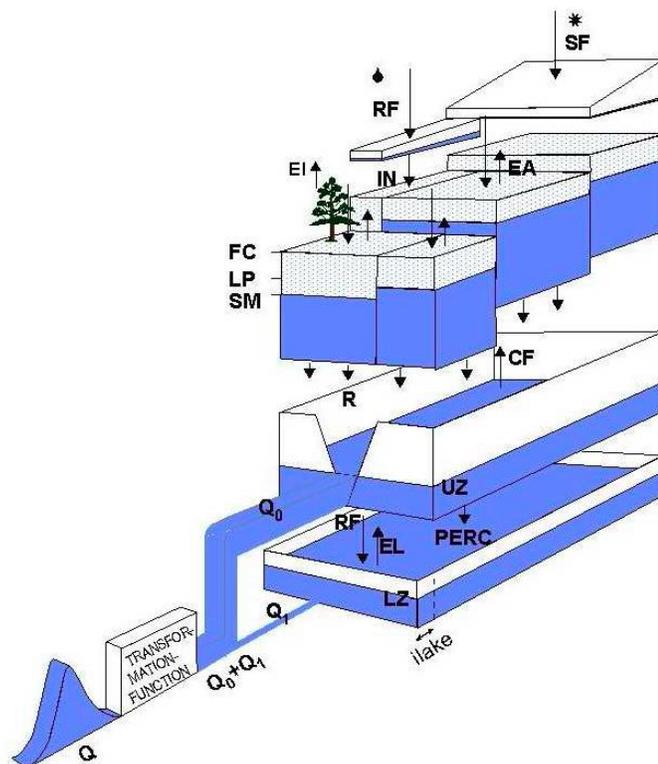


Imagen 2-12 Esquema del funcionamiento del modelo HBV.

En la figura anterior se presenta un esquema de las diferentes etapas del funcionamiento del modelo HBV de donde se pueden observar las diferentes subrutinas que conforman el modelo. Estas se explican a continuación.

a.) Subrutina de precipitación y acumulación de nieve.

Esta subrutina controla la precipitación registrada en las estaciones y la transforma a una precipitación efectiva que es la que producirá escorrentía después de tomar en cuenta factores como la intercepción y evaporación para el caso de la lluvia y el derretimiento en el caso de la nieve.

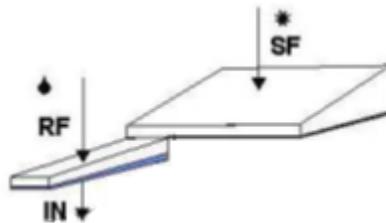


Imagen 2-13 Esquema de la subrutina de precipitación.

En este paso los cálculos de precipitación son hechos por separado para cada zona delimitada por la combinación de vegetación y elevación dentro de la cuenca

Para separar los cálculos entre lluvia y nieve se usa un umbral de temperatura

$$RF = pcorr * rfcf * P, \text{ si } T > tt$$

$$SF = pcorr * sfcf * P, \text{ si } T < tt$$

RF = Lluvia (rainfall).

SF = Nieve (snowfall).

P = Precipitación registrada.

T = Temperatura registrada (°C).

Tt = Umbral de temperatura.

rfcf = Factor de corrección de lluvia (rainfall correction factor).

sfcf = Factor de corrección de nieve (snowfall correction factor).

pcorr = Factor general de corrección de la precipitación.

Los factores de corrección de la precipitación, *rfcf* y *sfcf* representan errores en el registro, generalmente causados por el viento. *pcorr* representa los errores que se generan por registros de precipitación no representativos.

b.) Subrutina de humedad del suelo.

Esta subrutina controla la acumulación de humedad en el suelo desde que este se encuentra completamente seco hasta su saturación, que es cuando se producirá la escorrentía, además de tomar en cuenta factores como la infiltración y percolación que servirán para generar el caudal base en la época seca.

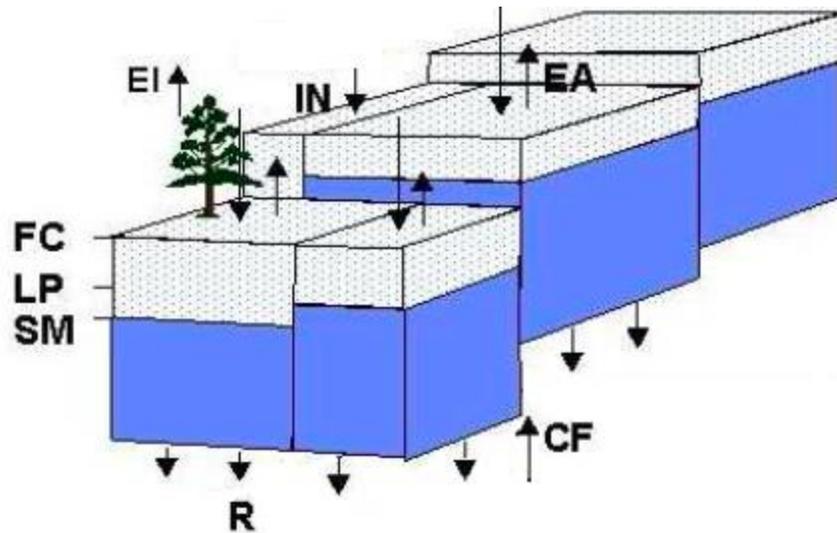


Imagen 2-14 Esquema de la subrutina de humedad del suelo.

En el esquema se presentan los parámetros que toma en cuenta esta subrutina, estos se definen a continuación:

EI = Evapotranspiración potencial

IN = Es el influjo de entrada proveniente de la precipitación corregido por factores

EA = Evaporación

FC = Capacidad de campo del suelo (field capacity), es el valor de humedad de saturación del suelo

LP = límite de evapotranspiración potencial

SM = Humedad del suelo

R = Escorrentía

CF = Flujo capilar ascendente.

La rutina de cuantificación de la humedad del suelo es la parte principal del control de la formación de escorrentía. Esta rutina está basada en tres parámetros, β , l_p y f_c . β controla la contribución de la respuesta de la función $(\Delta Q/\Delta P)$ o el incremento en la humedad del suelo $(1 - \Delta Q/\Delta P)$ de cada milímetro de lluvia o nieve derretida. La fracción $\Delta Q/\Delta P$ es también llamada coeficiente de escorrentía y ΔQ es llamado precipitación efectiva. l_p es un valor de humedad del suelo al cual la evapotranspiración alcanza su valor potencial y f_c es el almacenamiento máximo de humedad (en mm) en el modelo.

El parámetro l_p está dado como una fracción de f_c .

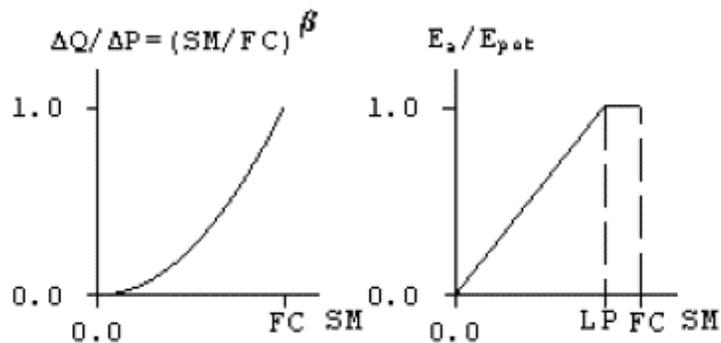


Imagen 2-15 Variación de la humedad del suelo.

Donde:

- SM = Humedad del suelo.
- ΔP = Contribución de la lluvia o de la nieve derretida.
- ΔQ = Contribución de la función de respuesta.
- FC = Humedad máxima del suelo.
- B = Coeficiente empírico.
- E_{pot} = Evapotranspiración potencial.
- E_a = Evapotranspiración calculada.
- LP = Límite de evapotranspiración.

El efecto de la rutina del suelo es que la contribución de escorrentía de la lluvia o nieve derretida es menor cuando el suelo está seco (valores bajos de humedad del suelo), y mayor a condiciones húmedas la evapotranspiración actual decrece tanto como el suelo se seca.

c.) Subrutina de respuesta.

En este punto se suman los caudales producidos por la escorrentía directa y el caudal base, generando el caudal de salida.

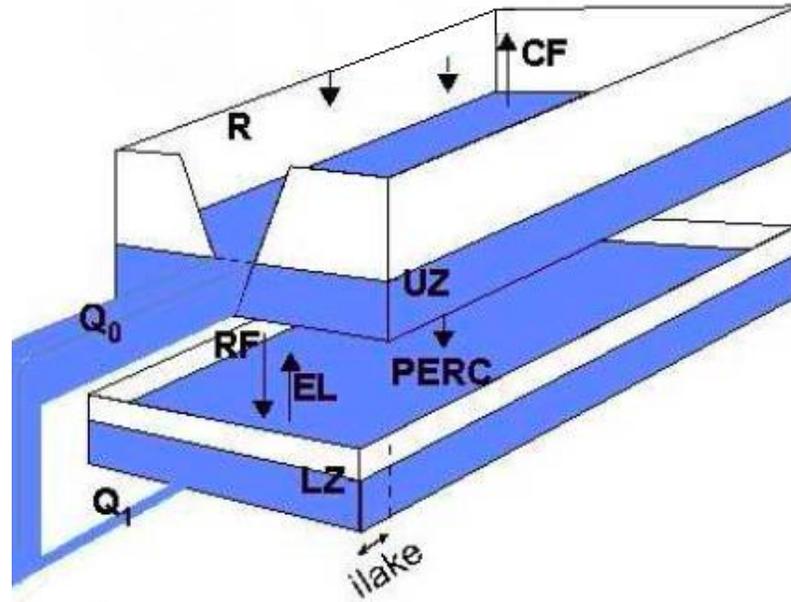


Imagen 2-16 Esquema de la función de respuesta.

UZ = Contenido de humedad de la caja de respuesta superior.

LZ = Contenido de humedad de la caja de respuesta inferior.

PERC = Percolación

EL = Evaporación en lagunetas sin desagüe.

RF = Lluvia sobre lagunetas.

Q0 = Caudal de salida de la caja de respuesta superior

Q1 = Caudal de salida de la caja de respuesta inferior

Q = $Q_0 + Q_1$, caudal total de salida.

La escorrentía generada por la función de respuesta que transforma el exceso de agua de la zona de humedad del suelo a escorrentía es también incluida en el efecto de la precipitación directa y evapotranspiración en una parte que representa lagos, ríos y otras áreas húmedas. La función consiste de un reservorio superior no lineal y un reservorio inferior lineal. Estos son el origen de una escorrentía rápida o lenta en el hidrograma.

El rendimiento de la zona de humedad del suelo, al igual que la precipitación efectiva, se agregarán al reservorio superior. Tanto como halla agua en el reservorio superior, el agua filtrará al reservorio inferior de acuerdo al parámetro perc. A un alto rendimiento del suelo, la infiltración no es suficiente para mantener el reservorio superior vacío y la descarga generada tendrá una contribución directa desde el reservorio superior el cual representa el drenaje a través de canales superficiales. El reservorio inferior, por otra parte, representa el almacenamiento subterráneo de la captación que contribuye al flujo base.

El flujo de salida del reservorio superior es descrito por una función correspondiente a un continuo incremento del coeficiente de recesión

$$Q_0 = k \cdot UZ^{(1+alfa)}$$

Q_0 = Flujo de salida del reservorio superior (mm).

UZ = Contenido de agua del reservorio superior (mm).

k = Coeficiente de recesión del reservorio superior.

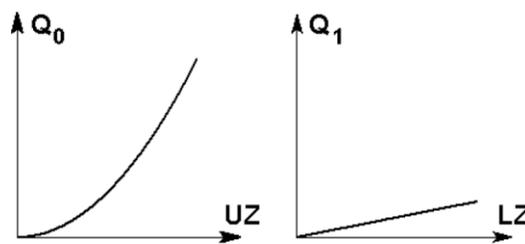


Imagen 2-17 Variación del caudal en el depósito superior e inferior.

El parámetro alfa es una medida de la no linealidad, típicamente de la orden de 1. El programa usa el parámetro khq , hq y alfa para calcular un valor de k , así que $hq = khq \cdot UZ_{hq}$. Es un flujo de alto nivel al cual la recesión khq es asumida. El valor de hq debe seleccionarse en la parte superior del rango de datos de descarga observados, se podría utilizar un valor igual a la media geométrica de MHQ y MQ , (MQ es la media de la descarga observada para todo el período y MHQ la media anual de los picos). Una estimación del coeficiente de recesión a hq puede hacerse del hidrográma observado y este ser usado como una primera aproximación del valor de khq . Cabe mencionar que hq corresponde al flujo de salida de la caja de respuesta, y no al flujo después del enrutamiento a través del sistema de ríos y lagos.

El flujo de salida del reservorio lineal inferior se determina como:

$$Q1 = k4 \cdot LZ$$

$Q1$ = Flujo de salida del reservorio inferior.

$k4$ = Coeficiente de recesión del reservorio inferior.

LZ = Contenido de agua del reservorio inferior.

Pequeños lagos sin subcuencas son considerados como parte del reservorio inferior. El área de estos reservorios puede así ser mayor que el área del reservorio superior. Lagos grandes a la salida de la subcuenca son tratados por separado.

d.) Función de transformación.

En este punto el modelo transforma el caudal resultante de la función de respuesta y le da forma al hidrograma resultante.

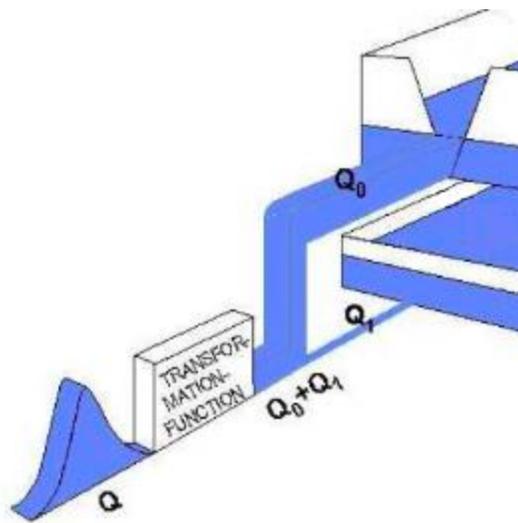


Imagen 2-18 Esquema de la función de transformación.

La escorrentía generada por la rutina de respuesta es encaminada a través de una función de transformación con el fin de obtener una forma adecuada del hidrograma a la salida de la subcuenca. La función de transformación es una simple técnica de filtro con una distribución triangular de los pesos.

El tiempo base de la distribución triangular está dado por el parámetro $maxbas$.

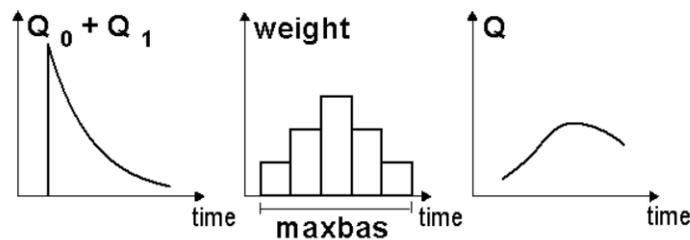


Imagen 2-19 Generación del hidrograma a través de la función de transformación.

(Instituto Hidrológico Sueco, 2006)

2.4. Balance Hídrico.

2.4.1. ¿Qué es el Balance Hídrico?

Un balance hídrico es la cuantificación e interrelación tanto de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico, como de los consumos de agua de los diferentes sectores de usuarios en un área determinada o una cuenca; dando como resultado un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en cuanto a su oferta, disponibilidad y demanda en dicha área. (Servicio Nacional de Estudios Territoriales - Servicio Hidrológico Nacional, 2005)

2.4.2. Objetivos e importancia de los estudios del Balance Hídrico

El Balance Hídrico es un medio para solucionar problemas hidrológicos teóricos y prácticos; su determinación en lagos, cuencas superficiales y cuencas subterráneas, es fundamental para conseguir un uso más racional de los recursos de agua en el espacio y en el tiempo, así como para mejorar el control y redistribución de los mismos; por ejemplo: trasvases de cuencas, control de máximas crecidas, etc.

El Balance Hídrico ayuda en la predicción de las consecuencias debidas a cambios artificiales en el régimen de ríos, lagos y cuencas subterráneas; la información que proporciona para cortos períodos de tiempo (estaciones, meses, semanas y días) se utiliza para explotación de embalses y para predicciones hidrológicas.

El conocimiento del Balance Hídrico es también muy importante para el estudio del Ciclo Hidrológico. Con los datos del balance hídrico es posible comparar recursos específicos de agua en un sistema, en diferentes períodos de tiempo, y establecer el grado de su influencia en las variaciones del régimen natural. (UNESCO, 1981)

2.4.3. Ecuación del Balance Hídrico.

El estudio del Balance Hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como Ecuación de Continuidad. Esta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación en volumen de agua almacenada.

La ecuación del Balance Hídrico, para cualquier zona o cuenca natural (tal como la cuenca de un río) o cualquier masa de agua, se compone de los valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada en la zona o masa de agua. En general, las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación (P), en forma de lluvia o nieve, realmente recibida en la superficie del suelo, y las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la cuenca o masa de agua desde fuera (Q_{sl} y Q_{ul}). Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de agua (E) y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada (Q_{so} y Q_{uo}). Cuando las entradas superan a las salidas el volumen de agua almacenada (ΔS) aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye. Por tanto, el balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo, en su forma más general, vendrá representado por la siguiente ecuación:

Ecuación 2.6

$$P + Q_{sl} + Q_{ul} - E - Q_{so} - Q_{uo} - \Delta S = 0$$

(UNESCO, 1981)

2.4.4. Cálculo de los componentes del Balance Hídrico.

2.4.4.1. Precipitación.

La precipitación se define como los productos líquidos o sólidos de la condensación del vapor de agua que cae desde las nubes o depositado desde el aire sobre la tierra. Esto incluye lluvia, granizo, nieve, rocío, escarcha, precipitaciones de escarcha y niebla. La cantidad de precipitación que llega al suelo en un período determinado se expresa en términos de la profundidad vertical de agua (o agua equivalente en el caso de formas sólidas) para la cual esta podría cubrir una proyección horizontal de superficie terrestre. Las nevadas también son expresadas por la profundidad de nieve fresca recién caída cubriendo una superficie horizontal. (World Meteorological Organization, 2008)

La precipitación es, normalmente, la única fuente de humedad que tiene el suelo y por eso conviene que su medida y cálculo se hagan con gran precisión, pues de ello depende, en gran manera, la exactitud de todos los cálculos del balance hídrico.

Para calcular balances hídricos medios son necesarias series extensas de precipitación (alrededor de 25-50 años). Para estimar los datos que faltan es aconsejable establecer relaciones gráficas de datos observados en estaciones vecinas o usar el método de correlación. (UNESCO, 1981)

a) Medición de la Precipitación.

Los aparatos más utilizados para medir la precipitación son los Pluviómetros y los Pluviógrafos (Imagen 2-20).

Los Pluviómetros proporcionan un dato puntual sobre la precipitación acumulada, estos pueden ser convencionales o automáticos, dependiendo de la forma en que se realice el registro; en los convencionales, una persona se encarga de tomar los datos cada cierto tiempo; mientras que en los automáticos, los datos se obtienen de forma digital durante intervalos de tiempo establecidos, o cada vez que se acumula una determinada cantidad de precipitación, según sea su construcción o configuración.

Los Pluviógrafos grafican de forma continua y automática la precipitación acumulada (Pluviograma), permitiendo llevar un registro más detallado y realizar cálculos más exactos.

b) Deducción de datos faltantes.

Es frecuente que en un registro de precipitación falten los datos de un cierto período, debido a la ausencia del operador o a fallas del aparato registrador. En estos casos se pueden estimar los datos faltantes si se tienen registros simultáneos de algunas estaciones situadas cerca de la estación en cuestión como en la Imagen 2-20 a y b, donde se correlacionan las precipitaciones medias en una estación cercana o el promedio de las medidas en varias estaciones circundantes con la registrada en la estación en estudio.

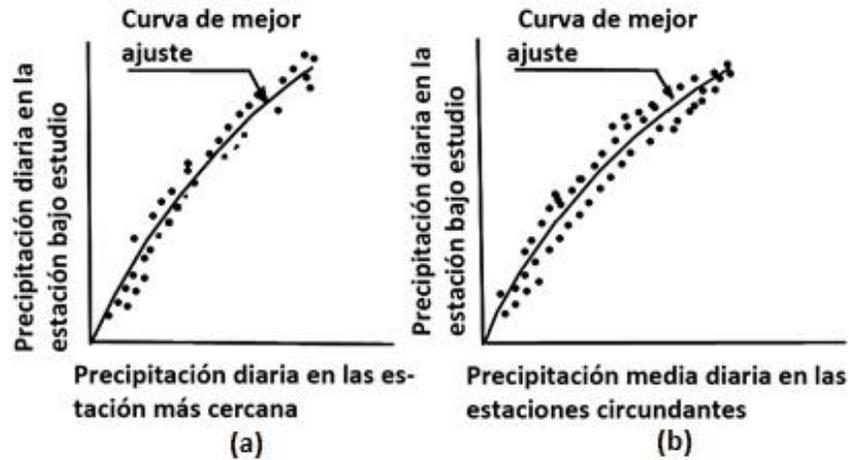


Imagen 2-20 Deducción de datos faltantes.

Una vez obtenida esta gráfica, y si la correlación es aceptable, bastaría conocer la precipitación media en las estaciones circundantes consideradas en los días en cuestión para deducir los datos faltantes.

Cuando la correlación obtenida del análisis anterior no es aceptable, se puede usar otro método, basado en la precipitación media anual que sigue dos tipos de criterios:

- Si la precipitación media anual en cada una de las estaciones circundantes difiere en menos del 10% de la registrada en la estación en estudio, los datos faltantes se estiman haciendo un promedio aritmético de los registrados en las estaciones circundantes.
- Si la precipitación media anual de cualquiera de las estaciones circundantes difiere en más de 10%, se usa la fórmula:

Ecuación 2.7

$$h_{p_x} = \frac{1}{n} \left[\frac{p_x}{p_1} h_{p1} + \frac{p_x}{p_2} h_{p2} + \dots + \frac{p_x}{p_n} h_{pn} \right]$$

Dónde:

h_{pi} = altura de precipitación registrada el día en cuestión en la estación auxiliar i .

h_{p_x} = altura de precipitación faltante en la estación en estudio.

p_i = precipitación media anual en la estación auxiliar i .

p_x = precipitación media anual en la estación en estudio.

n = número de estaciones auxiliares.

Para obtener resultados confiables, es recomendable que el número de estaciones auxiliares n sea como mínimo tres.

c) Precipitación Media.

En general, la altura de lluvia que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores aunque sea en sitios cercanos. El Pluviómetro y el Pluviógrafo registran lluvia puntual, es decir, la que se produce en el punto en que está instalado el aparato y, para los cálculos ingenieriles, es necesario conocer la lluvia media en una zona dada, como puede ser una cuenca.

d) Cálculo de la Precipitación Media sobre una zona.

- Método aritmético.

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

Ecuación 2.8

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

Donde:

\bar{P} = es la altura de precipitación media.

P_i = es la altura de precipitación registrada en la estación i .

n = es el número de estaciones bajo análisis.

- Polígonos 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 (líneas discontinuas en la Imagen 2-21). Con ello se forman triángulos en cuyos vértices están las estaciones pluviométricas.
2. Trazar líneas rectas que bisectan los lados de los triángulos (líneas rectas continuas en la Imagen 2-21). Por geometría elemental, las líneas correspondientes a cada triángulo convergerá en un solo punto.
3. Cada estación pluviométrica quedará rodeada por las líneas rectas del paso 2, que conforman los llamados polígonos de Thiessen y, en algunos casos, en parte por el parteaguas de la cuenca (ver Imagen 2-21). El área encerrada por los polígonos de Thiessen y el parteaguas será el área de influencia de la estación correspondiente.

- Método de las Isoyetas

Este método consiste en trazar, con la información registrada en las estaciones, líneas que unen los puntos de igual altura de precipitación llamadas isoyetas, de modo semejante a como se trazan las curvas de nivel en topografía. Imagen 2-22

La precipitación media se calcula en forma similar a la Ecuación 2.8 pero ahora el peso es el área A' , entre cada dos isoyetas y el parteguas de la cuenca y la cantidad que se pesa es la altura de precipitación promedio entre dos isoyetas, \bar{P} :

Ecuación 2.9

$$\bar{P} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^{n'} (\bar{P}_i A'_i)$$

Donde: n' es el número de áreas A'_i consideradas

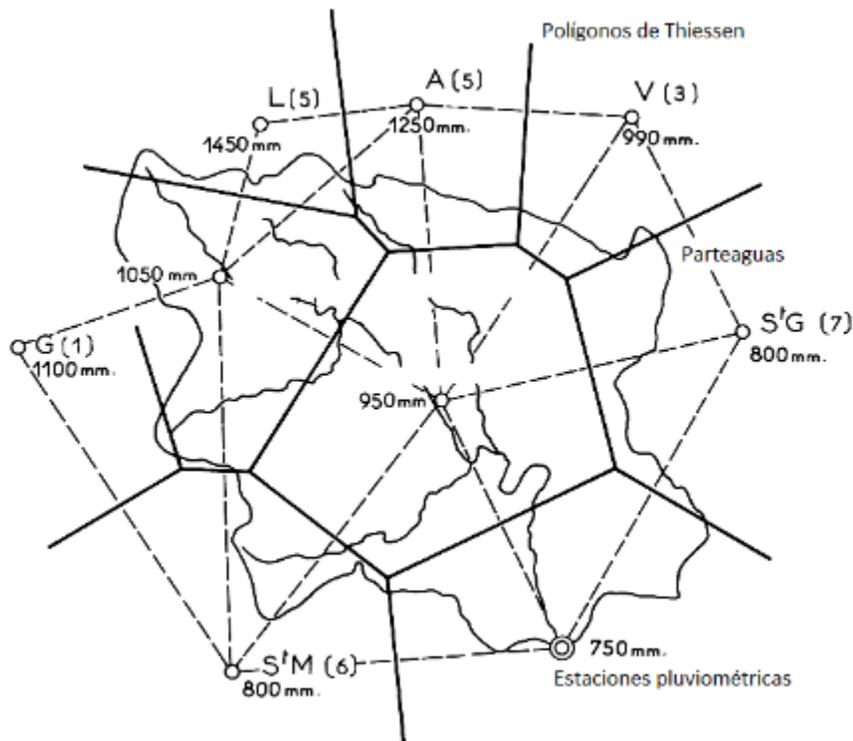


Imagen 2-21 Polígonos de Thiessen.

2.4.4.2. Infiltración.

Infiltración se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares.

La diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y el que escurre por su salida recibe el nombre genérico de pérdidas. En general, las pérdidas están constituidas por la intercepción en el follaje de las plantas y en los techos de las construcciones, la retención en depresiones o charcos (que posteriormente se evapora o se infiltra), la evaporación y la infiltración. Además de que en la práctica es difícil separar estos cuatro componentes, la porción más considerable de las pérdidas está dada por la infiltración, por lo que es costumbre calcularlas conjuntamente bajo este nombre.

En general, el volumen de infiltración es varias veces mayor que el de escurrimiento durante una tormenta dada, especialmente en cuencas con un grado de urbanización relativamente bajo. (Francisco Javier Aparicio Mijares, 1989)

Recarga de Agua Subterránea (Método RAS)

Se entiende como recarga de agua subterránea o recarga acuífera a la infiltración del agua superficial que pasa la zona no-saturada del subsuelo, y que llega a la zona saturada de agua subterránea para formar parte de un acuífero.

El Método RAS es un procedimiento simplificado que determina un valor teórico aproximado de la recarga acuífera, estimando la disponibilidad de agua en la atmósfera para una cuenca a través de la precipitación, la evapotranspiración real y un coeficiente de infiltración; sin tomar en cuenta los flujos laterales y circulantes en la zona no-saturada.

Principalmente la recarga acuífera depende de los siguientes criterios:

- Precipitación
- Evaporación/Transpiración
- Geología, Sistema de Fallas
- Subsuelo, Textura del substrato
- Vegetación
- Uso de Suelo
- Topografía, Pendientes/Escoventía
- Profundidad hacia el acuífero

La ecuación del Método RAS es la siguiente:

$$\text{Ecuación 2.10} \quad R = BC * C$$

Donde:

R = Recarga Subterránea o Recarga Acuífera (mm/año).

BC = Balance Climático (mm/año).

C = Coeficiente de Infiltración (adimensional).

Balance Climático (BC): es la transferencia neta de agua que se da entre la atmósfera y el suelo, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 2.11} \quad BC = P - ETr$$

Donde:

P = Es la precipitación obtenida a través de un mapa de isoyetas realizado con las precipitaciones promedios de los últimos 30 años (mm/año).

ETr = Es la evapotranspiración real obtenida a través de un mapa de isolineas (mm/año).

Coeficiente de Infiltración (C): es un valor adimensional que expresa la infiltración potencial para una zona dada. Este valor se encuentra entre 0.11 y 0.90, sin poder llegar al 100%, ya que se estiman en 10% los factores no calculados como precipitaciones inefectivas e influencia de actividad humana:

$$\text{Ecuación 2.12} \quad C = k_p + k_v + k_{fc}$$

Donde:

k_p = Indica la fracción del Balance Climático (BC) que se infiltra por efecto de la pendiente del terreno. Las zonas a las que se aplica este factor se obtienen de un mapa de distribución de la pendiente en porcentaje (Anexo 26) según la Tabla 2-2

k_v = Indica la fracción del BC que se infiltra por efecto de la cobertura vegetal. Las zonas a las que se aplica este factor se obtienen de un mapa de distribución de uso de suelos (Anexo 26) según la Tabla 2-3.

k_{fc} = Indica la fracción del BC que se infiltra por efecto de la textura del suelo. Las zonas a las que se aplica este factor se obtienen de un mapa de tipos de suelos, en el que se combinan textura, origen y estado de consolidación (Anexo 26). Tabla 2-4

Tabla 2-2 Coeficientes topográficos utilizados en el Método RAS.

Pendiente	Kp	Profundidad hacia el agua subterránea
Muy plano	0.40	
<15%	0.15	2-1m
15-30%	0.10	
30-50%	0.07	<1m
50-70%	0.05	Tejido urbano cerrado, zonas comerciales, etc.
>70%	0.01	

Tabla 2-3 Coeficientes vegetativos utilizados en el Método RAS.

Por cobertura vegetal	Kv
Cuerpos de agua.	0.00
Salineras.	0.05
Playas, dunas y arena.	0.07
Pasto natural, zonas urbanas discontinuas, caña, granos básicos, etc.	0.10
Coníferas, palmeras, zonas urbanas verdes, etc.	0.15
Vegetación arbustiva, platanales y bananeras, tejido urbano, zonas comerciales, aeropuertos etc.	0.18
Bosques de café.	0.19
Bosques, lava reciente, etc.	0.20
Vegetación esclerófila o espinosa y cultivos de piña.	0.30

Tabla 2-4 Coeficientes de texturas de suelos utilizados en el Método RAS.

Por textura de suelo	Kfc
Suelos arcillosos, latosote de altura, zonas urbanas, suelos compactos impermeables.	0.10
Suelos de limo y arcilla combinados, litosoles y regosolo de valles.	0.15
Suelo arenoso, suelos recientes, suelos de cauces de ríos, suelos no muy compactos.	0.20

(Martín Junker)

2.4.4.3. Esguurrimiento.

El esguurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre, y que llega a una corriente para ser drenada hasta la salida de la cuenca.

El esguurrimiento puede presentarse de tres maneras:

- Esguurrimiento superficial: Es el que llega más rápido a la salida de la cuenca y proviene de la precipitación neta o efectiva, por lo que puede relacionarse con una tormenta en particular.
- Esguurrimiento subsuperficial: Depende de la permeabilidad de los estratos superiores del suelo; si estos son muy permeables, se le trata junto al esguurrimiento superficial, y si son poco permeables, junto al esguurrimiento subterráneo. Por ello es muy difícil distinguirlo entre los otros dos tipos.
- Esguurrimiento subterráneo: Es el que llega de manera más lenta a la salida de la cuenca y difícilmente es asociable a una tormenta en particular ya que puede tardar años en su recorrido.

a) Relaciones Lluvia – Escoorrentía.

En general, los registros de precipitación son más abundantes que los de esguurrimiento, y no se ven afectados por cambios en la cuenca, como construcción de obras de almacenamiento y derivación, talas, urbanización, etc. De modo que es conveniente contar con métodos que permitan determinar el esguurrimiento en la cuenca mediante las características de la misma y la precipitación.

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

1. Área de la cuenca.
2. Altura total de precipitación.
3. Características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.).
4. Distribución de la lluvia en el tiempo.
5. Distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca.

(Francisco Javier Aparicio Mijares, 1989)

El Software HBV calcula esta relación como se vio en el apartado 2.3.3.1.

b) Aforos.

Aforar una corriente significa determinar a través de mediciones el caudal que pasa por una sección dada. (Francisco Javier Aparicio Mijares, 1989)

- Método de Relación Sección – Velocidad.

Consiste en medir la velocidad en varios puntos de la sección transversal y después calcular el caudal por medio de la ecuación de continuidad.

Ecuación 2.13

$$Q = vA$$

La velocidad del flujo en una sección transversal de una corriente tiene una distribución como la que se muestra en la Imagen 2-23.

Para determinar el caudal no es suficiente entonces medir la velocidad en un solo punto, sino que es necesario dividir la sección transversal del cauce en varias subsecciones llamadas dovelas.

El caudal que pasa por cada dovela es:

Ecuación 2.14

$$q_i = a_i v_{mi}$$

Donde: a_i es el área de la dovela i y v_{mi} es la velocidad media en la misma dovela.

Entonces, el gasto total será:

Ecuación 2.15

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i$$

Donde: n es el número de dovelas.

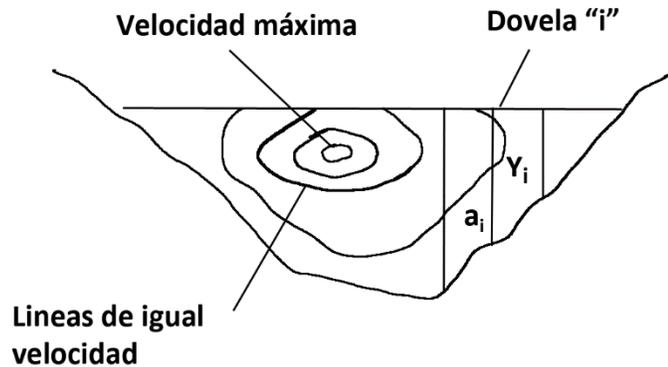


Imagen 2-23 Aforo por el método de la relación Sección - Velocidad.

- Aforo con Flotadores.

El método de flotadores es el más sencillo, pero en general es muy inexacto, por lo que se recomienda utilizarlo lo menos posible. Para el aforo con flotadores se debe escoger una sección recta del río o canal y medir y demarcar una distancia conocida a lo largo del mismo; se debe colocar suavemente sobre la superficie del agua un elemento flotante en el canal y simultáneamente activar el cronómetro y medir el tiempo transcurrido hasta que el objeto termine de recorrer la distancia asignada. Repetir este proceso varias veces y calcular el promedio. El objeto flotante debe ser arrojado suavemente sobre la corriente, para que este no le imprima una fuerza adicional que pueda afectar la medición.

La velocidad del agua se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 2.16

$$V = \frac{x}{t}$$

Donde: V = Velocidad superficial, m/s.

x = Longitud recorrida por el elemento flotante, m.

t = Tiempo de recorrido del elemento flotante, s.

El caudal se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 2.17

$$Q = nVA$$

Donde: Q = Caudal, m³/s.

V = Velocidad superficial, m/s.

A = Área transversal promedio, m².

n = Factor que depende del material del fondo del canal.

Tabla 2-5 Factores de corrección de caudal para aforos con flotador.

N	Tipo de fondo
0.4-0.52	Poco áspero
0.46-0.75	Grava con hierba y caña
0.58-0.7	Grava gruesa y piedras
0.7-0.9	Madera, hormigón o pavimento
0.62-0.75	Grava
0.65-0.83	Arcilla y arena

(Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM))

2.4.4.4. Evaporación y Evapotranspiración.

a) Evaporación.

Es el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en los almacenamientos, conducciones y en el suelo, en las capas cercanas a su superficie, a estado gaseoso y se transfiere a la atmósfera.

- Medición de la evaporación.

La evaporación puede medirse por medio de evaporímetros, que básicamente están formados por un recipiente en el que se coloca cierta cantidad de agua y se mide, diariamente o con la frecuencia que se estime conveniente.



Imagen 2-24 Evaporímetro Clase A.

- Cálculo de la evaporación en lagos y embalses.

Cuando no hay disponibilidad de datos climáticos, el método más empleado para estimar la evaporación es el tanque evaporímetro, habitualmente el denominado Clase A. Comparando los valores de la tasa de evaporación en tanques evaporímetros E_{pan} y en embalses E_{res} , se determinan experimentalmente los valores del coeficiente del tanque K_{pan} . El valor anual de esta constante de proporcionalidad varía entre 0.6 y 0.8, usando comúnmente el valor medio de 0.7; lo que implica que la evaporación en tanques es mayor que en los embalses; esto, debido a que las paredes del tanque transfieren mayor calor a la masa de agua.

Ecuación 2.18

$$E_{res} = K_{pan} \cdot E_{pan}$$

b) Transpiración.

Es el agua que se despiden en forma de vapor de las hojas de las plantas. Esta agua es tomada por las plantas naturalmente del suelo.

c) Evapotranspiración o Uso Consuntivo.

La evapotranspiración es la combinación de evaporación y transpiración, mientras que el uso consuntivo es la combinación de evapotranspiración y el agua que las plantas retienen para su nutrición. Esta última cantidad es pequeña en comparación con la evapotranspiración (aproximadamente representa sólo el 1%), por lo que los términos evapotranspiración y uso consuntivo se usan como sinónimos.

(Francisco Javier Aparicio Mijares, 1989)

- Evapotranspiración Potencial del cultivo de referencia (ET_o).

Se define como “la tasa de evaporación en mm/día de una extensa superficie de pasto (grama) verde de 8 a 15 cm de altura, en crecimiento activo, que sombrea completamente la superficie del suelo y que no sufre escasez de agua”.

- La Evapotranspiración Real (ET_r).

Es la que se produce realmente en las condiciones existentes en cada caso, y no bajo las condiciones de humedad óptimas planteadas en la Evapotranspiración Potencial, tomando en cuenta el agua disponible en el suelo y las condiciones ambientales en las que se desarrolla el cultivo determinado.

La evapotranspiración real de un cultivo, en cierto momento de su ciclo vegetativo, puede expresarse como:

$$ET_r = ET_o * k$$

Donde:

k = coeficiente que representa la fase vegetativa del cultivo y el nivel de humedad en el suelo.

En un suelo sin limitación alguna para la producción, en lo que respecta a condiciones físicas, fertilidad y salinidad, k puede calcularse de la siguiente manera:

$$k = k_c * k_h$$

Donde:

k_c = coeficiente de cultivo.

k_h = coeficiente de humedad del suelo.

(Eduardo A. Chávarri Velarde, 2004)

- Método de Hargreaves.

El método de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), utiliza parámetros térmicos y de radiación solar, que estima a partir de la radiación solar extraterrestre (datos disponibles en cualquier observatorio termométrico). El método presenta la ventaja de que se puede aplicar en cualquier observatorio con datos de temperatura, y que el método da resultados muy correlacionados con los obtenidos con el método de Penman.

Ecuación 2.19

$$ET_o = 0.0023 \cdot Ra \cdot (T - t)^{0.5} \cdot (T_m + 17.88)$$

Dónde:

ET_o = evapotranspiración del cultivo de referencia (césped) en mm/día

Ra = radiación solar extraterrestre expresada en equivalente de agua (mm/día)

$T-t$ = diferencia entre la media mensual de temperaturas máximas y mínimas (°C)

T_m = temperatura media del aire (°C)

Para la conversión de unidades se tendrá en cuenta que:

$$1 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1} = 4.185 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1} = 0.04185 \text{ MJ} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1} = 0.0171 \text{ mm/día}$$

$$1 \text{ mm/día} = 2.45 \text{ MJ} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1} = 58.5 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}.$$

CAPITULO 3

INFLUENCIA DE LA LAGUNA EL JOCOTAL EN LAS AVENIDAS DEL RÍO GRANDE DE SAN MIGUEL

3.1. Introducción.

Al inicio de esta investigación se planteó la siguiente problemática: “el incremento de nivel de la Laguna El Jocotal sin causas aparentes”, esto es, que la laguna aumenta de nivel sin que llueva en su sub-cuenca; y se consideró que dicha situación podría explicarse con un hipotético cambio en la interacción entre el Río Grande de San Miguel (RGSM) y la Laguna El Jocotal (LEJ), que durante la época seca se encuentran conectados por el río El Desagüe y en época lluviosa también por desbordes del RGSM.

Durante la investigación se pudo corroborar mediante entrevistas y visitas de campo que actualmente existe una conexión diferente entre ambos, que se da por la formación de un nuevo cauce que conecta directamente al RGSM con la LEJ.

Este cauce se originó debido al azolvamiento, que según los guarda recursos, inició a finales de la década de los 90's y tuvo su mayor intensidad aproximadamente en el año 2006, donde excesivas cantidades de basura y sedimentos obstruyeron el cauce natural del RGSM, a tal grado, que cesó la circulación de agua a través de él y propició que el río modificara la topografía del terreno y dirigiera su caudal a través de la unión del Brazo del Río Grande de San Miguel (BRGSM) con los brazos de la laguna: Brazo Puerto Viejo, Brazo La Pezota y Brazo de Don Juan. A este nuevo cauce lo denominaremos como “La Rotura”, ya que la zona donde este se formó en el RGSM es conocida con este nombre por los guarda recursos.

Esto fue así hasta el año 2010, donde el flujo de agua removió parte de la obstrucción de basura, habilitando nuevamente el antiguo cauce del RGSM y haciendo del cauce La Rotura una corriente intermitente, que durante la investigación transportó agua durante la época lluviosa, o en cada ocasión que el RGSM incrementara su nivel.

3.2. Cronología de la formación del cauce La Rotura.

A continuación se presenta una serie de imágenes en donde se explica cronológicamente cómo ha cambiado la conexión entre la LEJ y el RGSM durante la última década.

Imagen 3-2 Modificación de la hidrografía histórica causada por el cauce La Rotura.

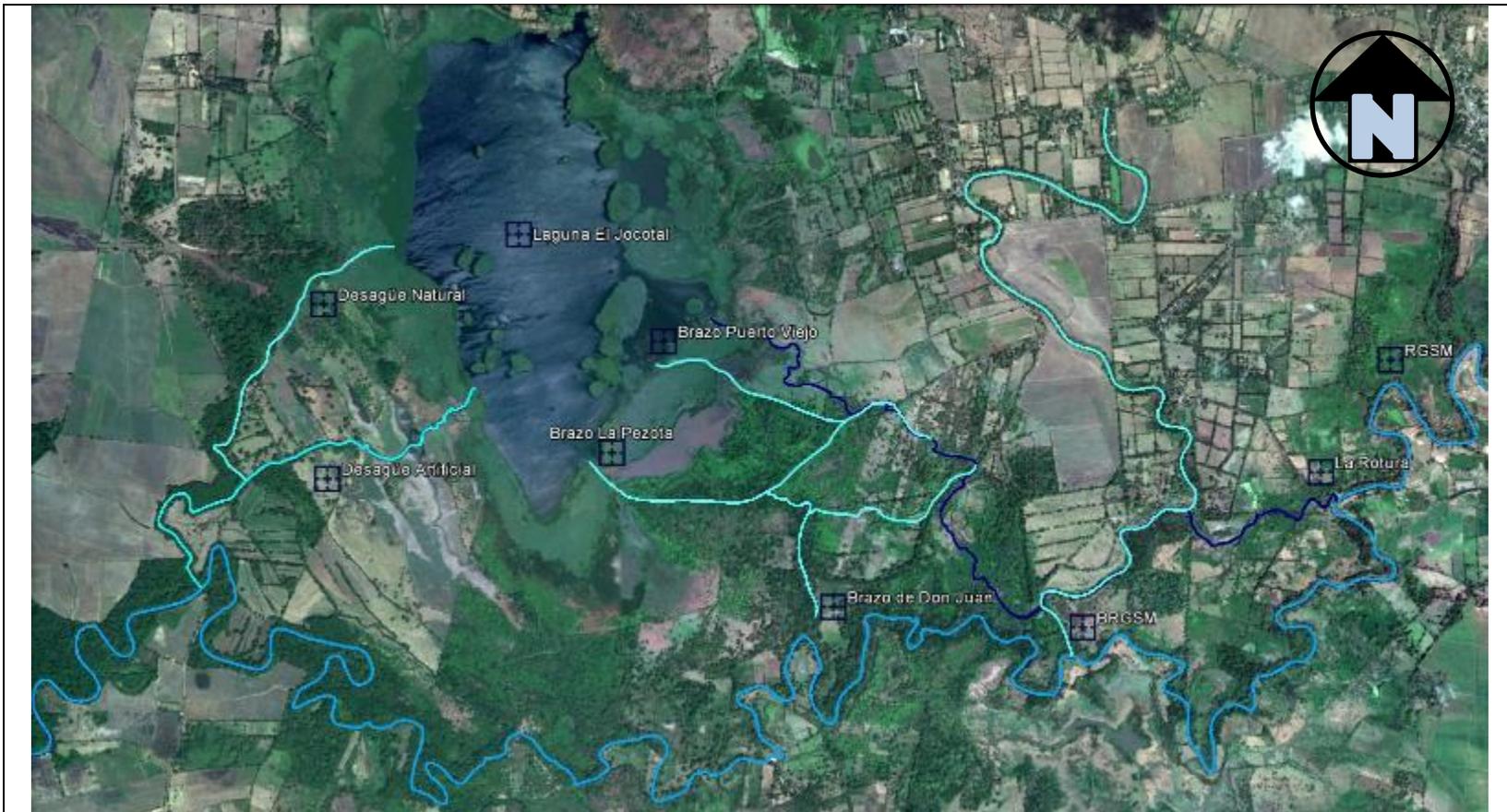
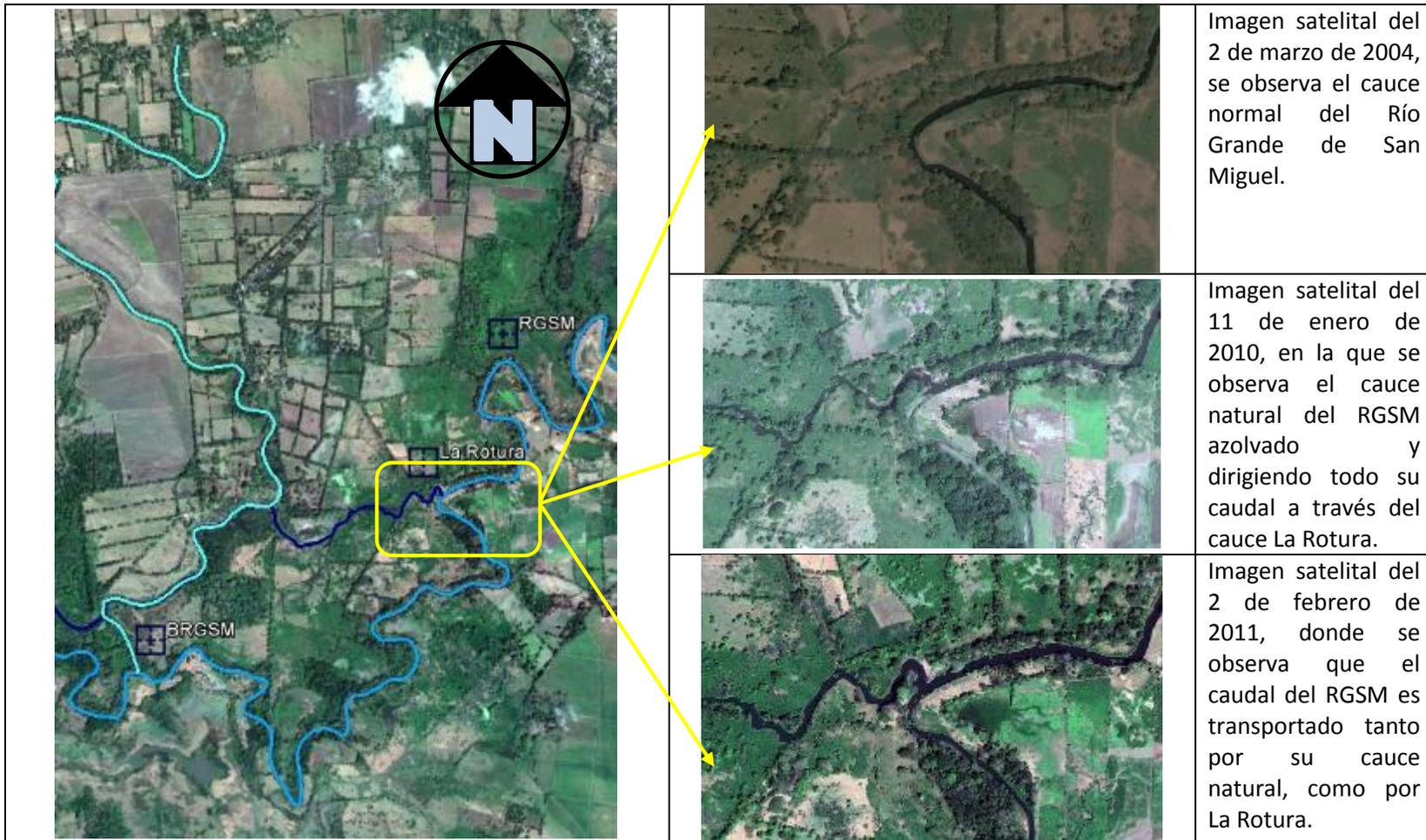


Imagen satelital en la que se puede apreciar cómo el cauce La Rotura (en color azul oscuro) unió al BRGSM con el Brazo de Don Juan, Brazo La Pezota y Brazo Puerto Viejo, (todos en color celeste) para finalmente dirigirse hacia la laguna.

Imagen 3-3 Formación histórica del cauce La Rotura.



Esto implica que se tienen tres períodos en los que el régimen fluvial del cauce La Rotura se ha modificado de manera muy significativa, estos son:

- 1970-2006: No existe el cauce La Rotura y el Río Grande de San Miguel ingresa caudal a la Laguna El Jocotal por desborde.
- 2006-2010: El cauce La Rotura transporta todo el caudal del RGSM hacia la Laguna El Jocotal.
- 2010- Actualidad: El Cauce La Rotura transporta parte del caudal del RGSM dependiendo de si en este existen bordas o no.

3.3. Hidrografía de la Laguna El Jocotal.

A través de entrevistas y el análisis de los registros de nivel de la laguna obtenidos durante la investigación, se supo que su espejo de agua crece durante la época lluviosa hasta unirse con el Río Grande de San Miguel y las lagunas ubicadas al sur de éste; por lo tanto, se considera que los ríos y quebradas que drenan de los cerros de Jucuarán son también afluentes a la Laguna El Jocotal durante la época lluviosa.

A continuación se presentan las micro-cuencas que aportan caudal a la Laguna El Jocotal durante la época lluviosa, y se describen los afluentes y efluentes más importantes para la investigación.

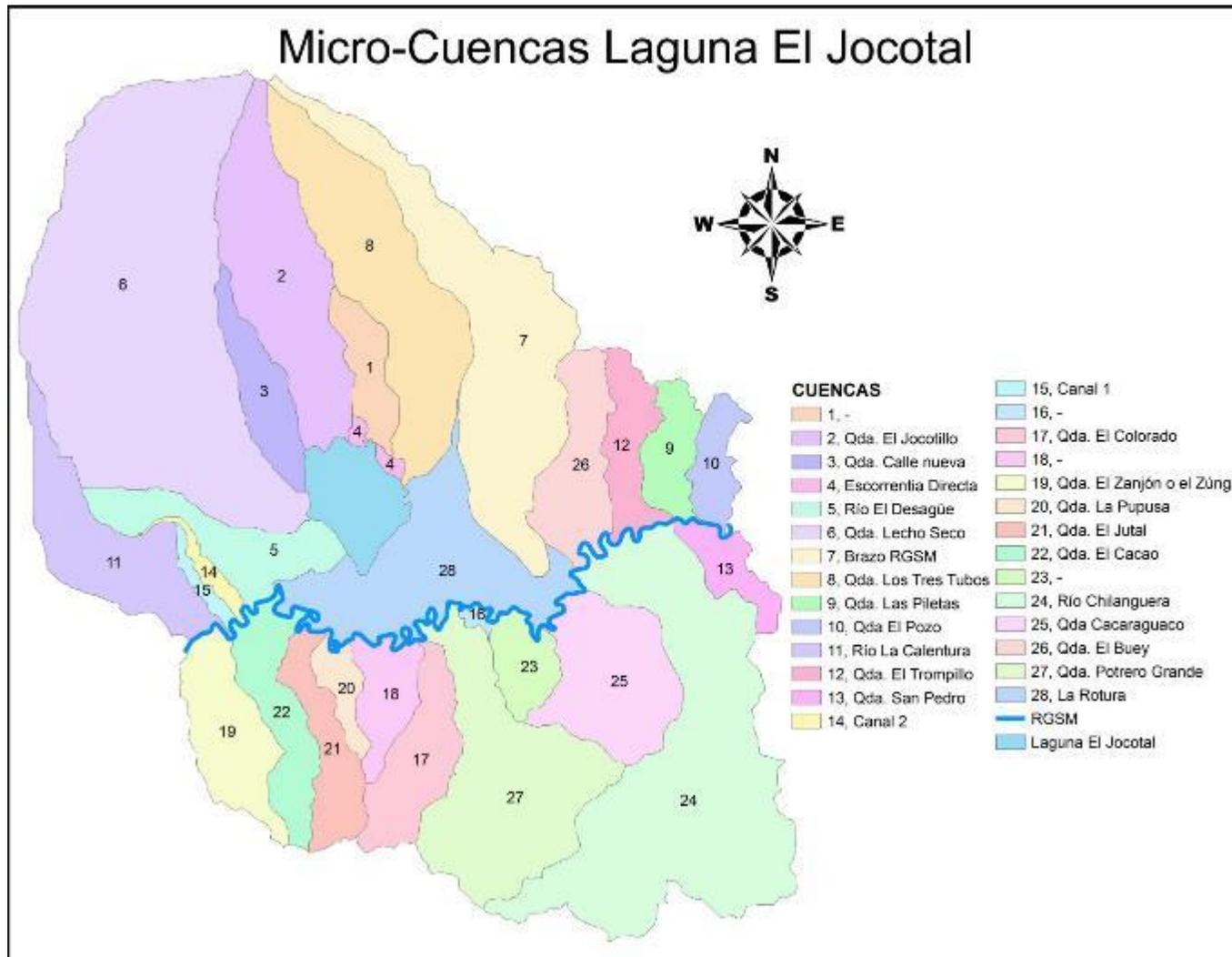


Imagen 3-4 Microcuencas Laguna El Jocotal.

3.3.1. Afluentes.



Imagen 3-5 Ubicación de los manantiales.



En la fotografía observamos las ondas expansivas producidas por el agua que brota de un manantial ubicado dentro de la laguna.



Al centro de la fotografía se observa la perturbación producida por otro manantial dentro de la laguna.

Imagen 3-6 Zona de manantiales.



La Poza Azul es el manantial más grande, más profundo y probablemente el más importante de la laguna, pues gracias a él, la zona que le circunda ha sido menos afectada por el azolvamiento, alcanzando los 3 m de profundidad efectiva, mientras que el resto del cuerpo de agua, en promedio se mantiene con una profundidad efectiva de 0.60 m.

De la poza azul solo se pudieron obtener fotografías de su superficie; en ésta, se observa el punto más profundo encontrado durante la batimetría: 14.96 m, el diámetro de la poza, ronda los 15 m.

Imagen 3-7 Poza Azul.

	<p>La Remolacha es el segundo manantial más grande y profundo de la laguna, éste sin embargo, no se pudo medir, ya que se encontraba bajo una isla flotante, compuesta principalmente por lirios acuáticos.</p> <p>Debido a esto, este manantial se tuvo que ubicar de forma aproximada con la ayuda de los guarda recursos, estableciéndolo a 100 m al sur de la Isla La Pelona y estimando su profundidad y diámetro en 6 y 10 metros respectivamente.</p> <p>En la fotografía se observa una isla flotante del mismo tipo que cubre al manantial La Remolacha.</p>
---	---

Imagen 3-8 La Remolacha.

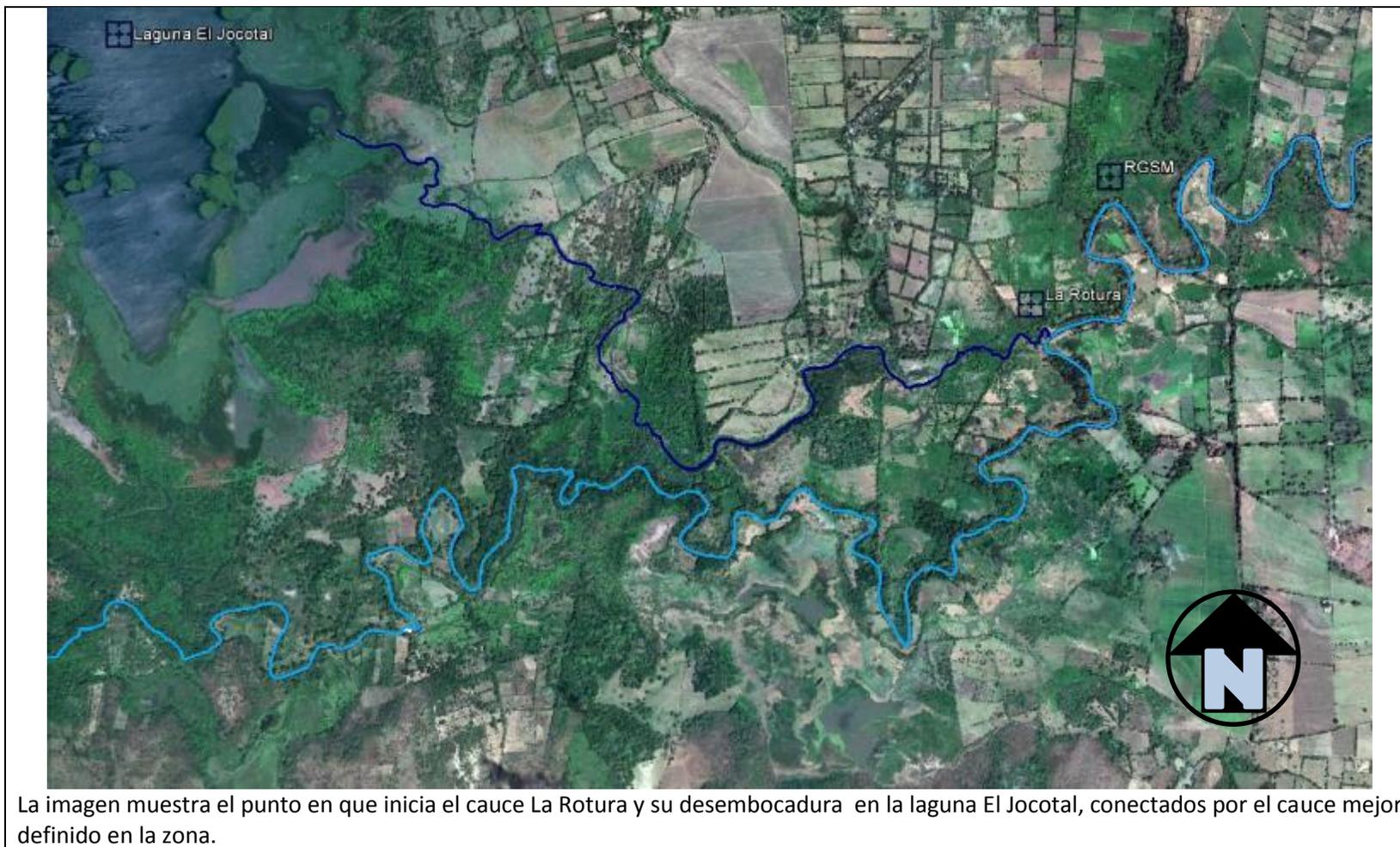
	
<p>Nos referimos a los manantiales que forman este cauce como “Manantiales Externos”, pues ni los cuadrantes, ni los pobladores de la zona les otorgan nombre.</p> <p>La fotografía muestra la zona aguas arriba de la desembocadura de este cauce en la laguna.</p>	<p>Fotografía que muestra la desembocadura en la laguna del cauce formado por los Manantiales Externos. Este cauce tiene de 1 a 2 metros de ancho, unos 35 cm de profundidad y recorre unos 500 m hasta desembocar en la laguna.</p>

Imagen 3-9 Manantiales externos.

 <p>A la izquierda se tiene el cauce del RGSM y a la derecha perpendicular a él, el cauce La Rotura.</p>	 <p>Normalmente el cauce La Rotura en época seca no transporta agua, pero sí mantiene agua estancada en algunas partes, como la mostrada en la fotografía.</p>
 <p>Agua estancada en el cauce La Rotura, en el punto en que se bifurca en dos corrientes antes de desembocar en la Laguna El Jocotal. Luego, la corriente de la izquierda se bifurcará nuevamente para formar una tercera.</p>	 <p>Tercera corriente del cauce La Rotura; ésta, es una planicie que en la década de los 70's se utilizaba para la siembra. Ahora el cauce La Rotura la ha "sepultado" bajo una capa de lodo de entre 50 cm a 1 m de profundidad.</p>

Imagen 3-10 Cauce La Rotura.

Imagen 3-11 Imagen satelital del cauce La Rotura.



La imagen muestra el punto en que inicia el cauce La Rotura y su desembocadura en la laguna El Jocotal, conectados por el cauce mejor definido en la zona.

3.3.2. Efluentes.

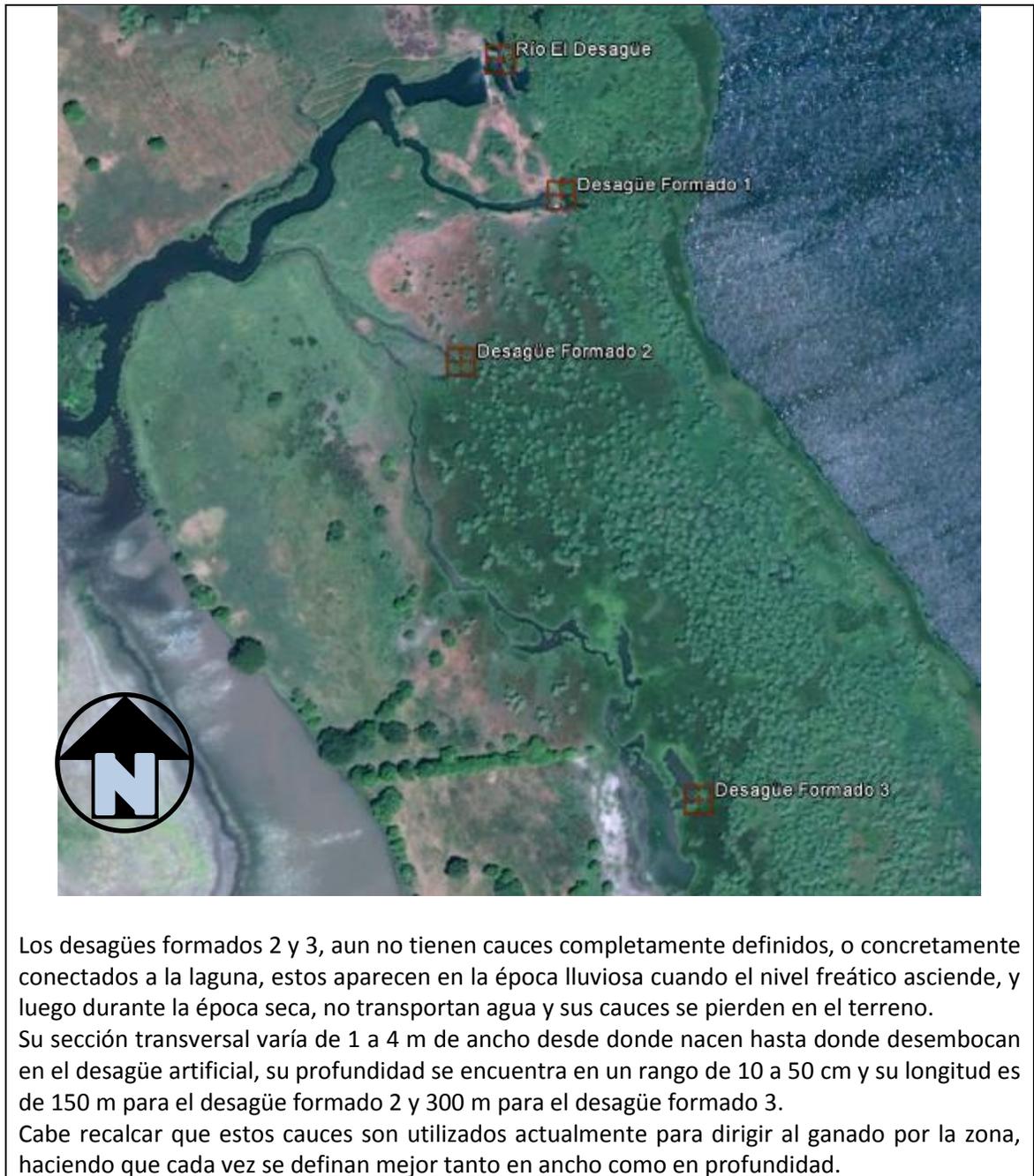


Imagen 3-12 Río El Desagüe y Desagües formados 1, 2 y 3.



En esta fotografía se puede observar el río El Desagüe (cauce artificial hecho a mediados de los 60's).

Imagen 3-13 Río El Desagüe.



En la fotografía se pueden observar los muros que actualmente “retienen” el agua de la laguna; estos fueron reparados a principios del año 2012, luego de haber sido fuertemente dañados por la DT-12E en octubre del 2011. Los muros están contruidos con gaviones y roca volcánica, por lo que el agua pasa a través de ellos por filtración.

A la derecha se tiene a la laguna, al centro una poza formada entre dos muros y a la izquierda el Río el Desagüe.

Imagen 3-14 Muros de retención principales ubicados en Río El Desagüe.



Este cauce inicialmente era intermitente y solo transportaba agua cuando el nivel freático ascendía durante la época lluviosa; sin embargo, con el tiempo se volvió permanente.

Imagen 3-15 Muros de retención secundarios ubicados en Desagüe formado 1.

	<p>Vista aguas arriba del desagüe natural de la Laguna El Jocotal.</p> <p>La laguna tuvo un descenso de nivel muy importante cuando se abrió el desagüe artificial a mediados de los 60's, a un grado tal, que como ahora pero por razones muy diferentes, alcanzó una profundidad efectiva de unas decenas de centímetros. Esto llevó a un conflicto entre pescadores y terratenientes, que concluyó con la construcción de muros para retener el agua y mantener un nivel adecuado en la laguna; sin embargo, el desagüe natural se secó con el tiempo, ya que los muros construidos en el desagüe artificial tenían una cota de nivel inferior, causando que el agua fluyera principalmente a través de ellos.</p>
	<p>Vista aguas abajo del desagüe natural de la Laguna El Jocotal.</p> <p>Este desagüe entró en un proceso de azolvamiento que aceleraron los terratenientes, obstruyéndolo completamente para "recuperar" tierras a la laguna.</p> <p>En las fotografías superiores se puede observar que actualmente este cauce no es identificable, debido a que todo el terreno se encuentra a un mismo nivel, sin embargo, los guarda recursos aún recuerdan su ubicación.</p>

Imagen 3-16 Desagüe natural.

3.3.3. Batimetría de la Laguna El Jocotal.

Para su desarrollo se consideraron los siguientes aspectos técnicos:

- La Laguna presentaba un espejo de agua aproximado de 2 Km de ancho por 3 Km de largo, y un fondo uniforme con azolvamiento avanzado, que mantiene una columna de agua de alrededor de 0.5 m de profundidad, por lo tanto para desplazarse por el espejo de agua, tuvo que utilizarse una canoa de remos y no una lancha con motor.
- No fue posible sondear las profundidades del contorno de la laguna, ya que el azolvamiento y la basta cantidad de plantas acuáticas hacen la zona inaccesible.
- Se tienen 2 manantiales profundos: La Poza Azul y La Remolacha, luego de la época lluviosa este último quedó inaccesible, obstruido por una isla de plantas acuáticas.

En base a lo anterior, la batimetría se desarrolló tomando 2 lecturas de profundidad: una hasta el fondo rocoso, y otra hasta la superficie de lodo. Las lecturas se tomaron en tres fases:

- 1- Establecimiento de punto con elevación fija e instalación de limnómetro.
- 2- Lecturas de profundidad a lo largo de todo el contorno navegable.
- 3- Lecturas de profundidad en una grilla con puntos a cada 100 m, delimitada por el contorno navegable.
- 4- Recorrido a lo largo del contorno externo de la laguna, para establecer una profundidad igual a cero (en esta etapa no se toman lecturas de profundidad).

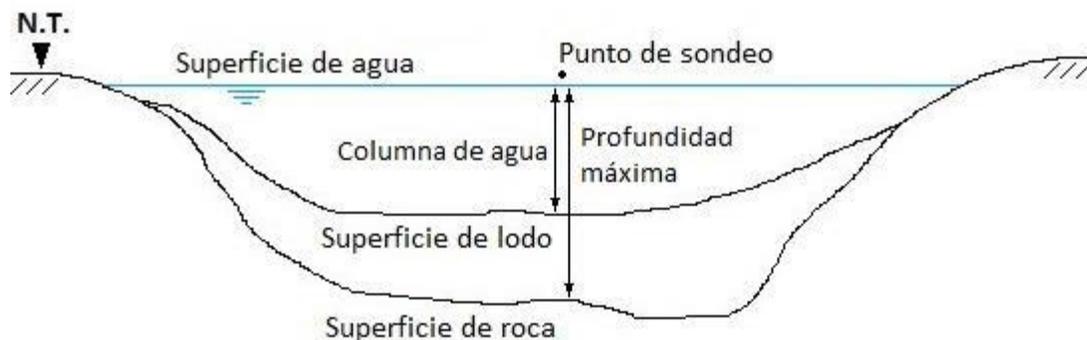


Imagen 3-17 Profundidad máxima y columna de agua para un punto de sondeo batimétrico.

Las profundidades se obtuvieron mediante 2 varas constituidas por varios tubos de hierro de 1 metro de largo, ensamblados según la profundidad que se necesitara en cada punto de sondeo. Para obtener la profundidad máxima se utilizó una vara con extremo agudo, mientras que para la columna de agua una vara con extremo plano. La diferencia entre ambas lecturas proporciona la capa de lodo.

	<p>Equipo utilizado para elaborar la batimetría. A la izquierda se tiene la vara con extremo agudo, a la derecha la vara con extremo plano, al centro y al fondo las varas extras para zonas profundas y al frente una cinta métrica con una plomada para sondear las profundidades del manantial Poza Azul.</p>
	<p>Sondeo batimétrico al suroeste de la laguna, utilizando vara con extremo plano. Punto 200 del contorno navegable.</p> <p>13°19'37.26" N 88°14'47.90" O Profundidad = 0.44m</p>
	<p>Sondeo batimétrico al suroeste de la laguna, utilizando vara con extremo agudo. Punto 200 del contorno navegable.</p> <p>13°19'37.26" N 88°14'47.90" O Profundidad = 1.78m</p>

Imagen 3-18 Equipo utilizado en la batimetría y ejemplo de sondeo.

3.3.3.1. Punto con elevación fija e instalación de limnómetro.

El punto con elevación fija se estableció en el muelle del caserío El Borbollón, y su elevación se obtuvo mediante el Mojón Merlos cuyas coordenadas son:

Tabla 3-1 Información geodésica del mojón Merlos.

Mojón Merlos		
Longitud	Latitud	Elevación
581441.570 m	247784.474 m	66.496 m.s.n.m.
88°14'53.50181"	13°20'56.60762"	

Se instalaron dos regletas: una en el muelle de la laguna para el control de las variaciones normales de nivel durante la época lluviosa, y el segundo en una torre de vigilancia de los guarda recursos para el control de nivel durante las inundaciones.

Tabla 3-2 Información geodésica del limnómetro de la Laguna El Jocotal.

Limnómetro Laguna El Jocotal		
Longitud	Latitud	Elevación - cero hidrométrico
581609.09 m	247613.54 m	26.919 m.s.n.m.
88°14'48.06"	13°20'47.46"	



Imagen 3-19 Limnómetro de la Laguna El Jocotal.

3.3.3.3. Mapas batimétricos.

Mapa 1 – Batimetría del fondo de la laguna.

Es notable que la zona de mayor profundidad coincide exactamente en dirección y ubicación con el que alguna vez fue el desagüe natural de la laguna. Éste se habría secado a principios de la década de los 70's, después de la construcción del desagüe artificial.

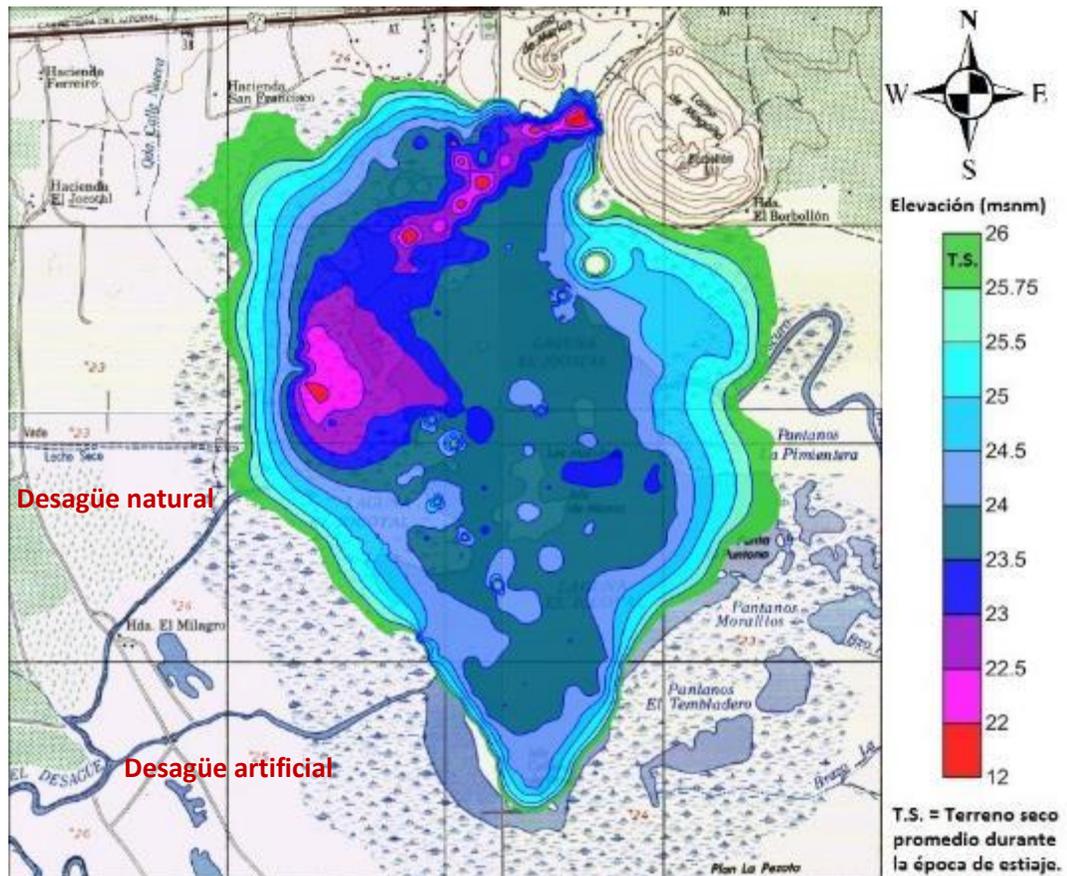


Imagen 3-21 Batimetría del fondo de la Laguna El Jocotal.

Tabla 3-3 Características de la batimetría del fondo de la Laguna El Jocotal.

Características	Valor	Unidad
Volumen de agua	8.443	Mm ³
Volumen de lodo	0.000	Mm ³
Incremento de lodo	0.000	Mm ³
Área del espejo de agua	5.062	Km ²
Profundidad promedio	2.179	m

Mapa 2 – Batimetría estimada para el año 2000.

Tanto la Ficha Ramsar de la Laguna El Jocotal como los guarda recursos, estiman que para finales de la década de los 90's durante la época seca, se tenía una columna de agua promedio de 1.5 m. Ahora, sabiendo que la capa de lodo tiene una superficie uniforme, estimamos la cota de azolvamiento para el año 2000 incrementando las profundidades recolectadas durante el año 2012, multiplicándolas por el factor $F = \frac{\text{Profundidad promedio 2000}}{\text{Profundidad promedio 2012}}$.

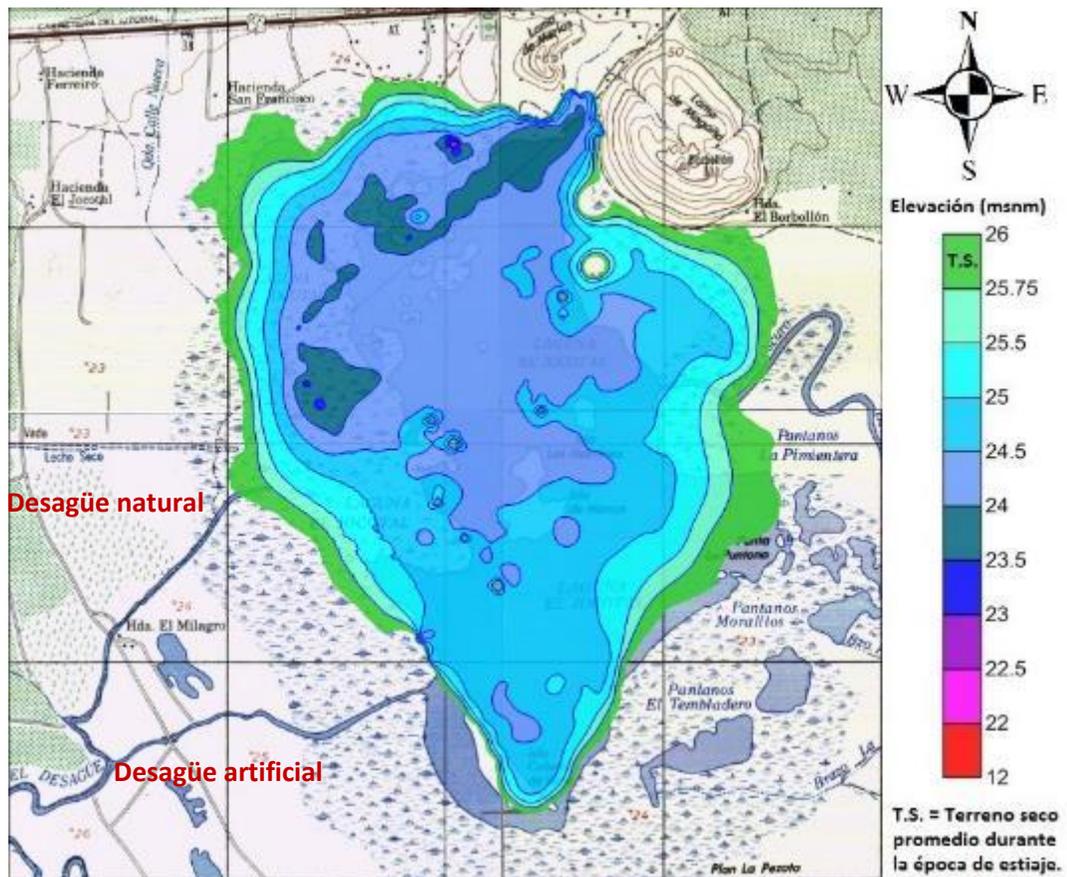


Imagen 3-22 Batimetría estimada para el año 2000.

Tabla 3-4 Características de la batimetría estimada para el año 2000.

Características	Valor	Unidad
Volumen de agua	5.292	Mm ³
Volumen de lodo	3.151	Mm ³
Incremento de lodo	3.151	Mm ³
Área del espejo de agua	4.913	Km ²
Profundidad promedio	1.500	m

Mapa 3 – Batimetría año 2012.

Observamos que la columna de agua de la laguna ha disminuido considerablemente y se estima que el volumen de lodo que esta almacena, se habría incrementado un aproximado de 2.9 Mm³ durante la última década. Además, es notable que la única zona profunda que se mantiene actualmente es la Poza Azul ubicada al norte.

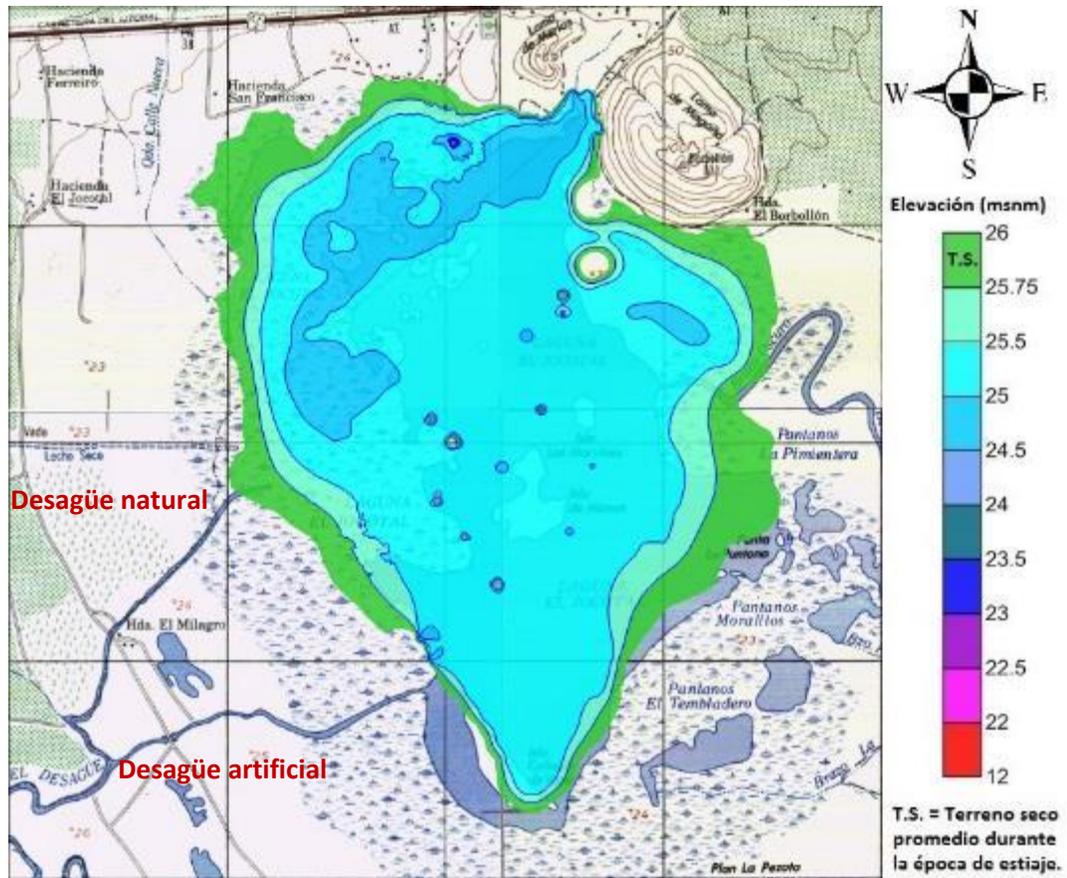


Imagen 3-23 Batimetría del año 2012.

Tabla 3-5 Características de la batimetría del año 2012.

Características	Valor	Unidad
Volumen de agua	2.417	Mm ³
Volumen de lodo	6.027	Mm ³
Incremento de lodo	2.876	Mm ³
Área del espejo de agua	4.605	Km ²
Profundidad promedio	0.804	m

3.4. Influencia de la Laguna El Jocotal en el tránsito de avenidas del RGSM

Para poder evaluar como el cauce La Rotura ha influido en la problemática de inundaciones de la Laguna El Jocotal, es necesario elaborar el modelo hidrológico de la cuenca del Río Grande de San Miguel, ya que sus desbordes son causados principalmente por las lluvias en la parte alta de su cuenca.

Como primer paso para la elaboración de este modelo, se analizan los registros históricos de caudal promedio diario (Qpd) y registros de niveles de las estaciones actuales, para determinar un comportamiento preliminar entre la LEJ del RGSM.

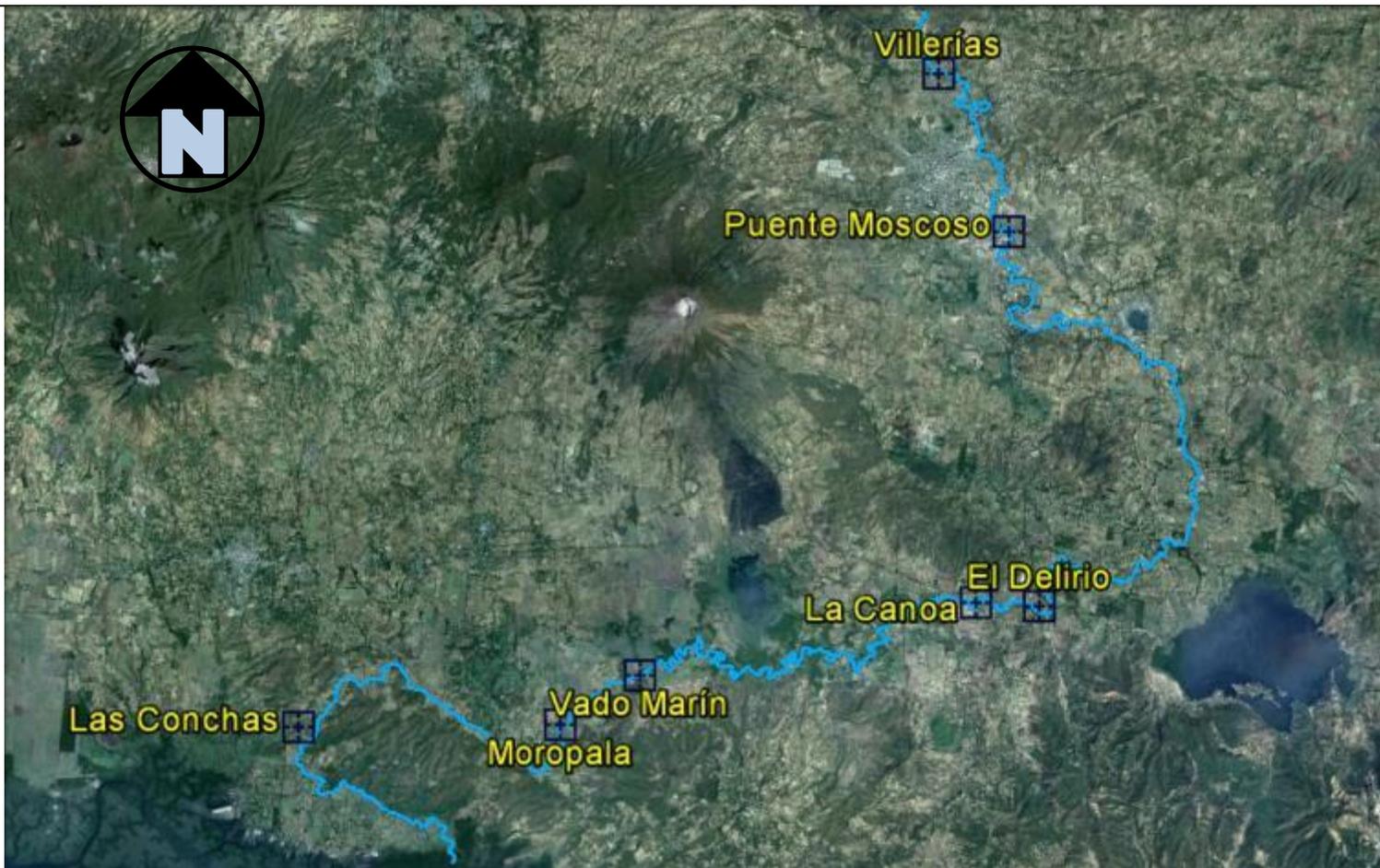
Los registros históricos analizados corresponden a 5 estaciones hidrométricas que existen o existieron en la zona. En orden de aguas arriba a aguas abajo son las siguientes:

Tabla 3-6 Estaciones hidrométricas en el RGSM.

Estación	Coordenadas			
	Polar N	Polar O	Lambert X	Lambert Y
Villerías	13,5186944	-88,1793333	588840,29	266684,69
Puente Moscoso	13,4616667	-88,1533333	591677,09	260385,73
El Delirio	13,3328611	-88,2530528	580923,76	246100,73
La Canoa ³	13,3282361	-88,1655167	590409,11	245620,26
Vado Marín	13,3020000	-88,2900000	576931,02	242674,55
Moropala ⁴	13,2842250	-88,3195972	573729,62	240698,89
Las Conchas	13,2833333	-88,4166667	563211,27	240572,61

³ Estación inicialmente llamada El Delirio desde 1963 hasta 1967, luego fue reubicada en 1977 y renombrada como “La Canoa”.

⁴ Estación nueva sin registro de datos históricos.



Las estaciones El Delirio y La Canoa se ubican aguas arriba del BRGSM y la estación Vado Marín se ubica aguas abajo de la desembocadura del Río el Desagüe en el RGSM.

Imagen 3-24 Estaciones hidrométricas en el Río Grande de San Miguel.

3.4.1. Análisis de caudales promedio diarios históricos.

Para iniciar el análisis de caudales, primero revisamos la disponibilidad de información, principalmente la de las estaciones La Canoa y Vado Marín, ya que por su ubicación, son las más importantes para determinar la influencia de la LEJ en el RGSM.

Según la disponibilidad de registros (Anexo 1), la mayoría de estaciones coinciden durante 1970-1981, pero las estaciones La Canoa y Vado Marín, únicamente coinciden durante 1977-1981, por lo que los registros de esas fechas fueron los que se utilizaron en este análisis.

Cabe mencionar que, aunque en la década de los 60's también coinciden los registros de El Delirio (que puede utilizarse en lugar de La Canoa) y Vado Marín, estos no fueron útiles, principalmente porque sus registros están incompletos.

Por otra parte, durante la década de los 80's los registros se perdieron al dejar de visitar y dar mantenimiento a las estaciones, debido al conflicto armado que se dio en nuestro país. Durante la década de los 90's se publicaron ciertos registros de caudales promedios diarios y mensuales; sin embargo, estos no habían sido procesados de manera correcta, por lo que no presentan un registro fiable; y finalmente, a lo largo de la década del 2000 se comenzaron a reinstalar estaciones hidrométricas cuyos datos serán analizados más adelante.

Ahora, partiendo de la base inicial de que, *“una estación aguas abajo debe registrar mayor caudal que otra ubicada aguas arriba”*, comenzamos el análisis con los datos de las estaciones La Canoa y Vado Marín, verificando que sus registros cumplan con esta condición. El análisis se hará graficando los caudales promedio diarios a nivel mensual.

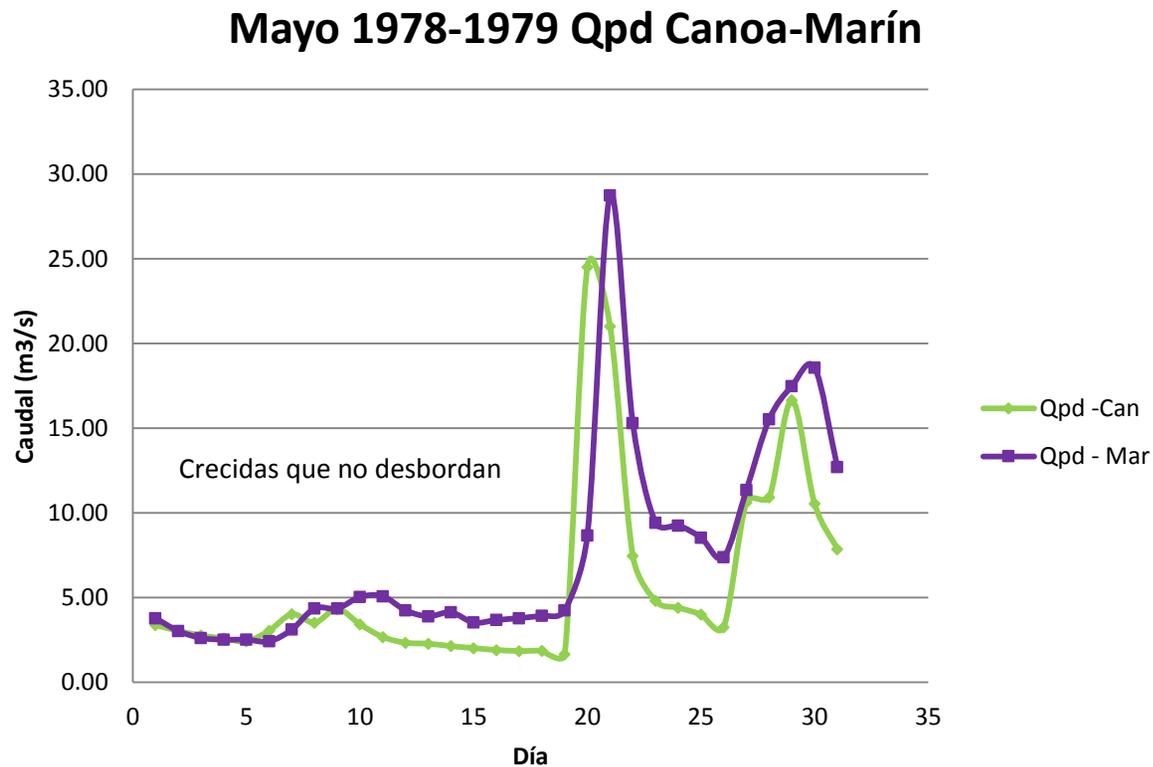
La relación entre las avenidas registradas entre La Canoa y Vado Marín se analizará tomando en cuenta los siguientes límites.

Tabla 3-7 Límites para analizar las avenidas registradas en La Canoa y Vado Marín.

Normal		$Q_{mar} > Q_{can}$ para caudales bajos. Asume que la crecida no desborda.
Extracción		$Q_{mar} < Q_{can}$ para caudales bajos durante la época seca. Asume que la pérdida se produce por extracciones para regadíos.
Laguna		$Q_{mar} < Q_{can}$ para caudales bajos. Asume que la laguna retiene parte del caudal del RGSM, sin embargo el hidrograma en vado Marín sigue creciendo.
Retención		$Q_{mar} < Q_{can}$ para caudales altos. Asume que la laguna retiene parte del caudal del RGSM. El hidrograma en Vado Marín deja de crecer
Planicie		$Q_{mar} > Q_{can}$ para caudales altos. Asume que la laguna se ha unido con el río y no es capaz de retener caudal.

Q_{can} , Q_{mar} : Caudal registrado en las estaciones La canoa y Vado Marín respectivamente.

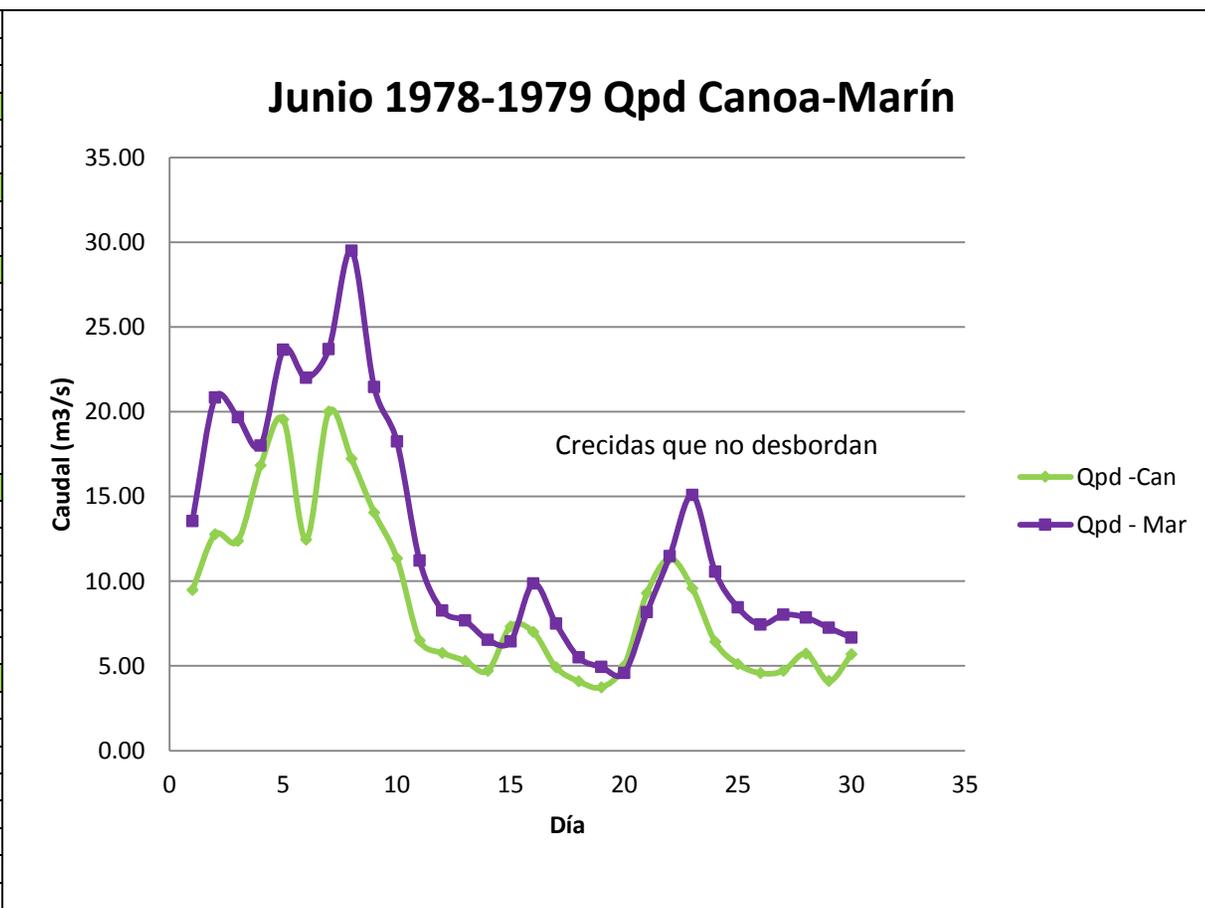
Mayo	1978-1979	
Día	Qpd -Can	Qpd - Mar
1	3.38	3.79
2	3.04	3.03
3	2.77	2.62
4	2.59	2.52
5	2.42	2.52
6	3.05	2.42
7	4.02	3.12
8	3.52	4.36
9	4.33	4.36
10	3.42	5.04
11	2.68	5.08
12	2.34	4.25
13	2.28	3.90
14	2.14	4.13
15	2.02	3.53
16	1.91	3.68
17	1.85	3.79
18	1.86	3.94
19	1.65	4.25
20	24.52	8.67
21	21.02	28.74
22	7.46	15.31
23	4.81	9.43
24	4.41	9.26
25	4.00	8.54
26	3.26	7.39
27	10.63	11.36
28	10.93	15.52
29	16.66	17.49
30	10.55	18.58
31	7.87	12.71
Qpm	5.72	7.53



Se observa un desfase de un día entre los picos de caudal que registran ambas estaciones.

Gráfica 3-1 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, mayo 1978-1979.

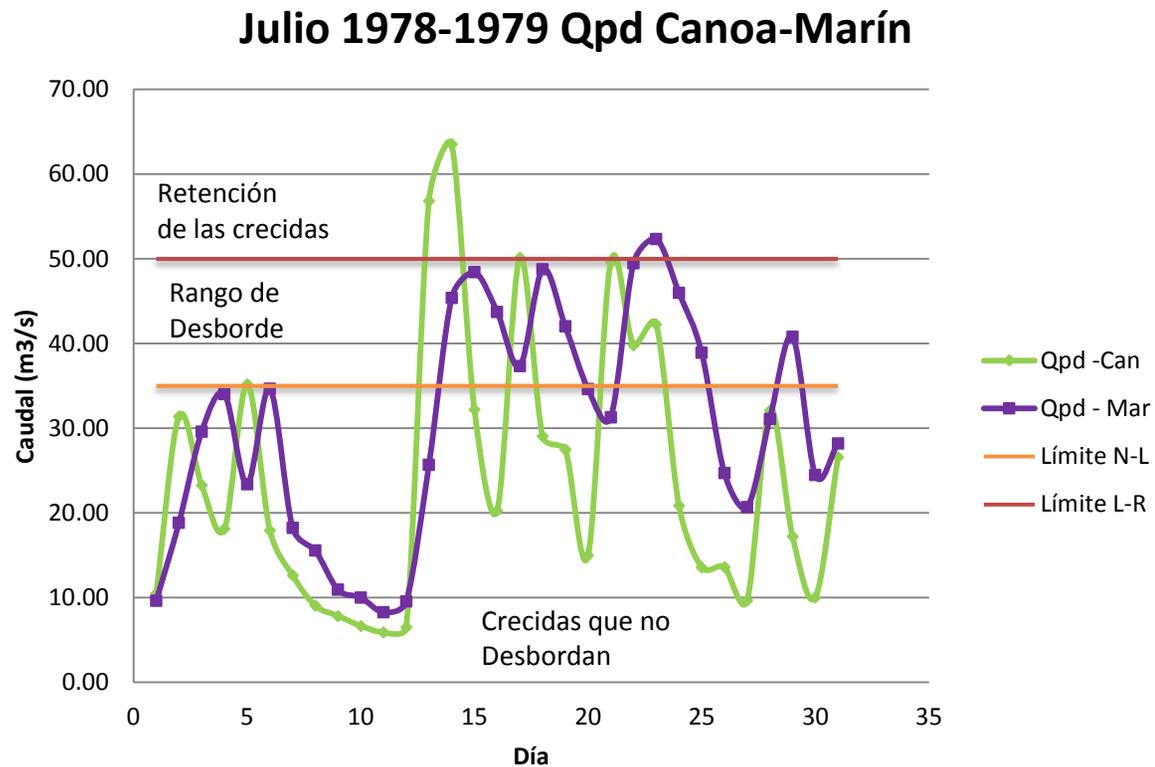
Junio	1978-1979	
Día	Qpd - Can	Qpd - Mar
1	9.48	13.54
2	12.77	20.84
3	12.37	19.66
4	16.83	18.00
5	19.54	23.65
6	12.45	22.00
7	20.00	23.69
8	17.22	29.50
9	14.05	21.45
10	11.35	18.24
11	6.49	11.21
12	5.77	8.26
13	5.30	7.67
14	4.71	6.54
15	7.33	6.44
16	7.00	9.86
17	4.91	7.49
18	4.09	5.49
19	3.74	4.93
20	5.01	4.58
21	9.29	8.17
22	11.34	11.47
23	9.58	15.08
24	6.42	10.56
25	5.11	8.45
26	4.57	7.44
27	4.71	8.01
28	5.73	7.85
29	4.11	7.25
30	5.68	6.67
Qpm	8.90	12.47



Se observa un desfase de un día entre los últimos 3 picos de caudal que registran ambas estaciones.

Gráfica 3-2 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, junio 1978-1979.

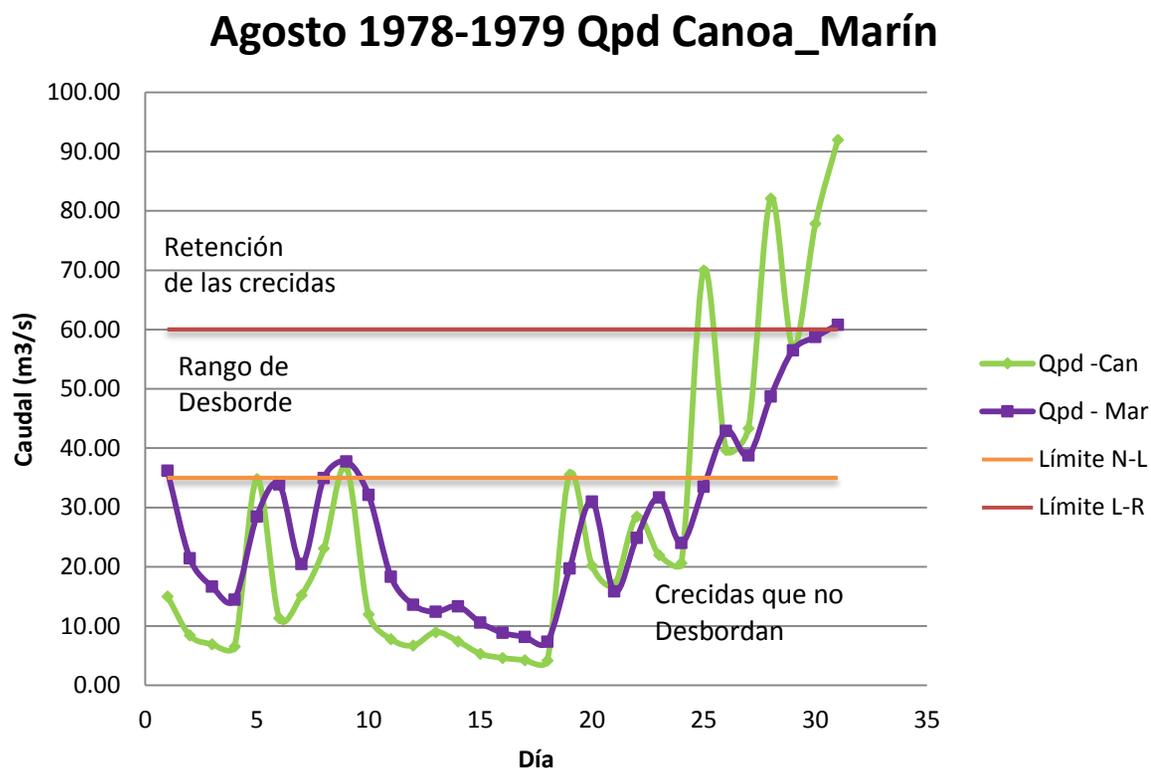
Julio	1978-1979	
Día	Qpd - Can	Qpd - Mar
1	10.51	9.62
2	31.38	18.83
3	23.28	29.60
4	18.11	34.03
5	35.20	23.40
6	17.95	34.65
7	12.64	18.25
8	9.05	15.56
9	7.84	10.93
10	6.67	10.02
11	5.91	8.26
12	6.51	9.55
13	56.83	25.67
14	63.55	45.38
15	32.21	48.43
16	20.27	43.74
17	50.17	37.32
18	29.07	48.75
19	27.48	42.02
20	14.99	34.63
21	49.63	31.30
22	39.79	49.46
23	42.27	52.35
24	20.86	45.99
25	13.59	38.91
26	13.62	24.71
27	9.68	20.68
28	32.12	31.10
29	17.22	40.80
30	10.04	24.49
31	26.58	28.21
Qpm	24.36	30.21



En los primeros picos de caudal del mes, cuando La Canoa se acercó a 35 m³/s, Vado Marín detuvo su incremento; sin embargo, cuando La Canoa supera este límite, Vado Marín continúa incrementando hasta un nuevo máximo de 50 m³/s. De momento se establecerán los 35m³/s como el límite en el que el RGSM cambia de comportamiento normal, al de aportación a la laguna (Límite N-L); y los 50 m³/s como límite de retención de volumen por parte de la laguna (Límite L-R).

Gráfica 3-3 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, julio 1978-1979.

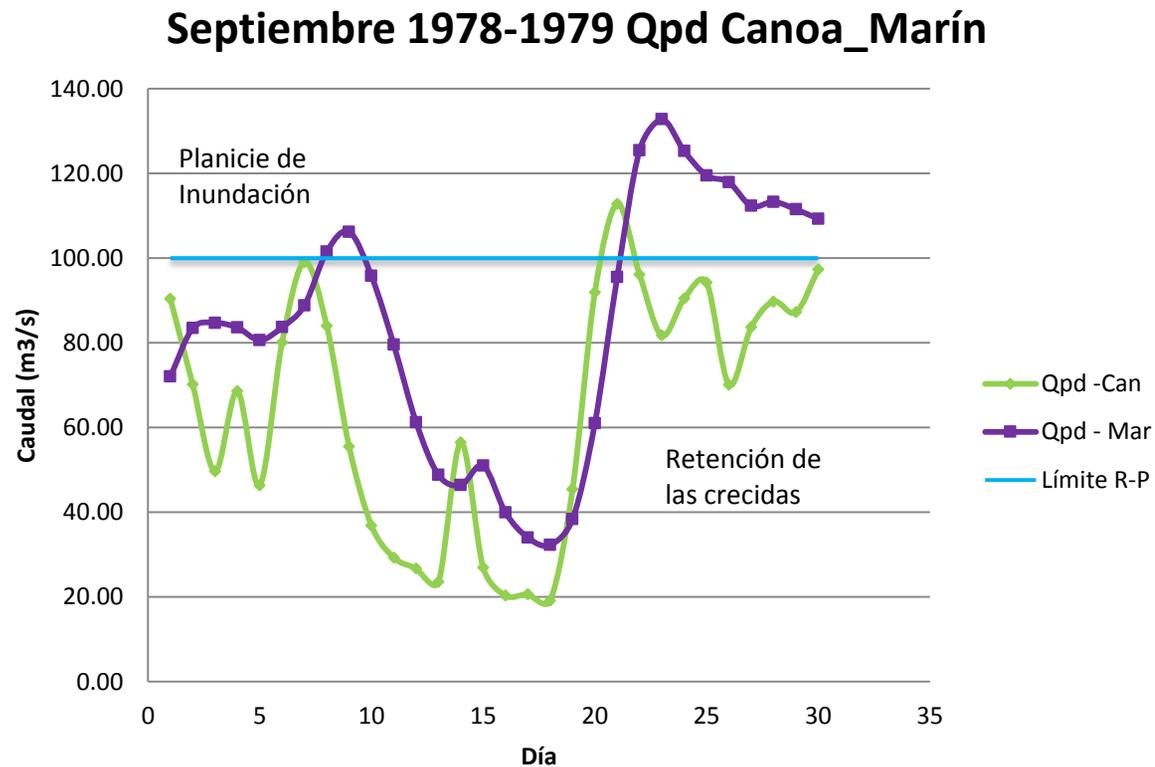
Agosto	1978-1979	
Día	Qpd - Can	Qpd - Mar
1	15.01	36.18
2	8.42	21.43
3	6.96	16.64
4	6.58	14.46
5	34.82	28.49
6	11.36	33.90
7	15.21	20.47
8	23.08	34.99
9	36.79	37.78
10	11.99	32.11
11	7.81	18.33
12	6.71	13.58
13	8.99	12.41
14	7.44	13.34
15	5.33	10.58
16	4.63	8.86
17	4.28	8.16
18	4.21	7.36
19	35.57	19.74
20	20.22	31.02
21	16.99	15.83
22	28.49	24.87
23	21.98	31.70
24	20.65	24.00
25	70.00	33.51
26	39.71	42.91
27	43.34	38.78
28	82.11	48.72
29	56.94	56.53
30	77.86	58.76
31	92.00	60.82
Qpm	26.63	27.62



En los primeros picos de caudal del mes, cuando La Canoa se acercó a 35 m³/s, Vado Marín detuvo su incremento; sin embargo, cuando La Canoa supera este límite, Vado Marín continúa incrementando hasta un nuevo límite máximo de 60 m³/s. Al igual que en el mes anterior se establecerán los 35 m³/s como el límite en el que el RGSM cambia de comportamiento normal, al de aportación a la laguna (Límite N-L); y los 60 m³/s como nuevo límite de retención de volumen por parte de la laguna (Límite L-R).

Gráfica 3-4 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, agosto 1978-1979.

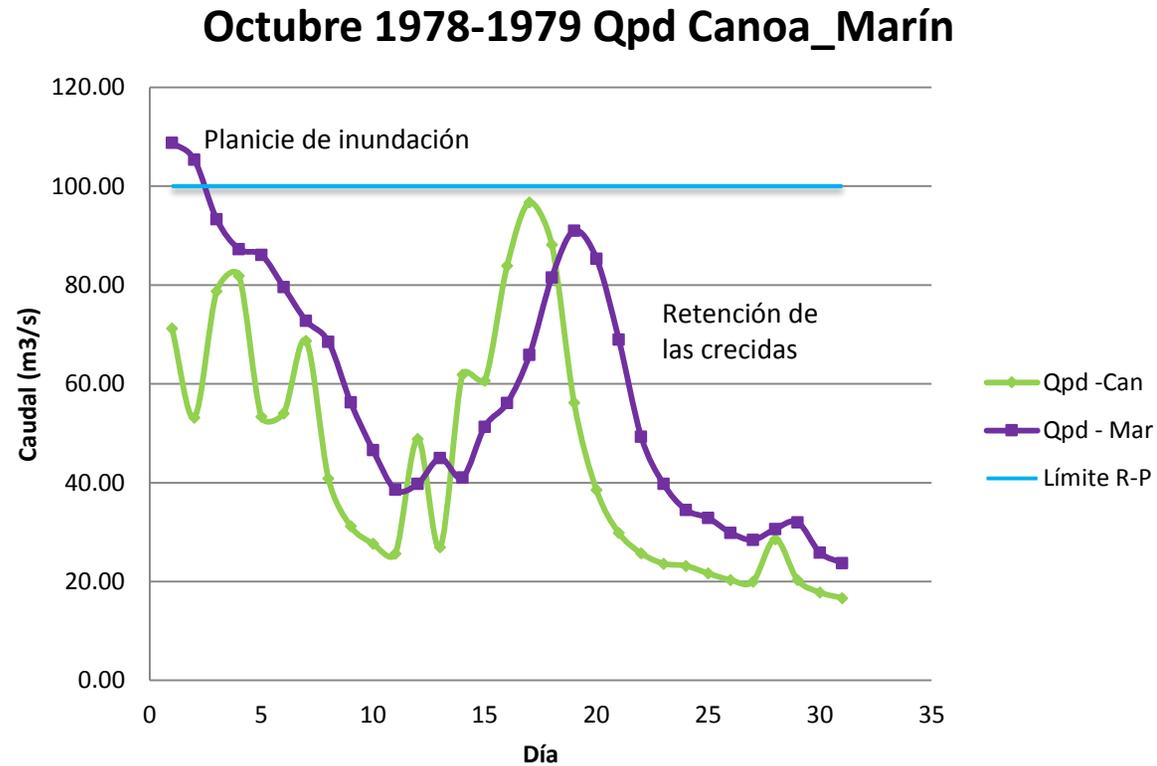
Septiembre	1978-1979	
Día	Qpd -Can	Qpd - Mar
1	90.40	72.04
2	70.18	83.45
3	49.62	84.71
4	68.57	83.61
5	46.34	80.65
6	80.07	83.69
7	99.04	88.85
8	84.02	101.55
9	55.55	106.22
10	36.91	95.80
11	29.30	79.55
12	26.74	61.25
13	23.58	48.81
14	56.49	46.40
15	26.95	51.01
16	20.30	39.95
17	20.64	34.01
18	19.14	32.28
19	45.41	38.37
20	91.92	60.99
21	112.84	95.51
22	96.14	125.46
23	81.75	132.79
24	90.48	125.27
25	94.20	119.53
26	70.11	117.91
27	83.72	112.32
28	89.75	113.29
29	87.23	111.52
30	97.34	109.25
Qpm	64.82	84.53



Se observa que al alcanzar La Canoa los 100 m³/s parece cambiar la condición de retención a planicie de inundación (Límite R-P), ya que Vado Marín refleja los aumentos de caudal aguas arriba, comportamiento que no sucedía en los límites anteriores, y que además estos picos de caudal se ven reflejados de forma atenuada debido al remanso que generaría la planicie de inundación. Cabe mencionar que la planicie de inundación no significa una afectación para las comunidades del sector, sino la anegación de los terrenos aledaños al cauce el Río Grande de San Miguel.

Gráfica 3-5 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, septiembre 1978-1979.

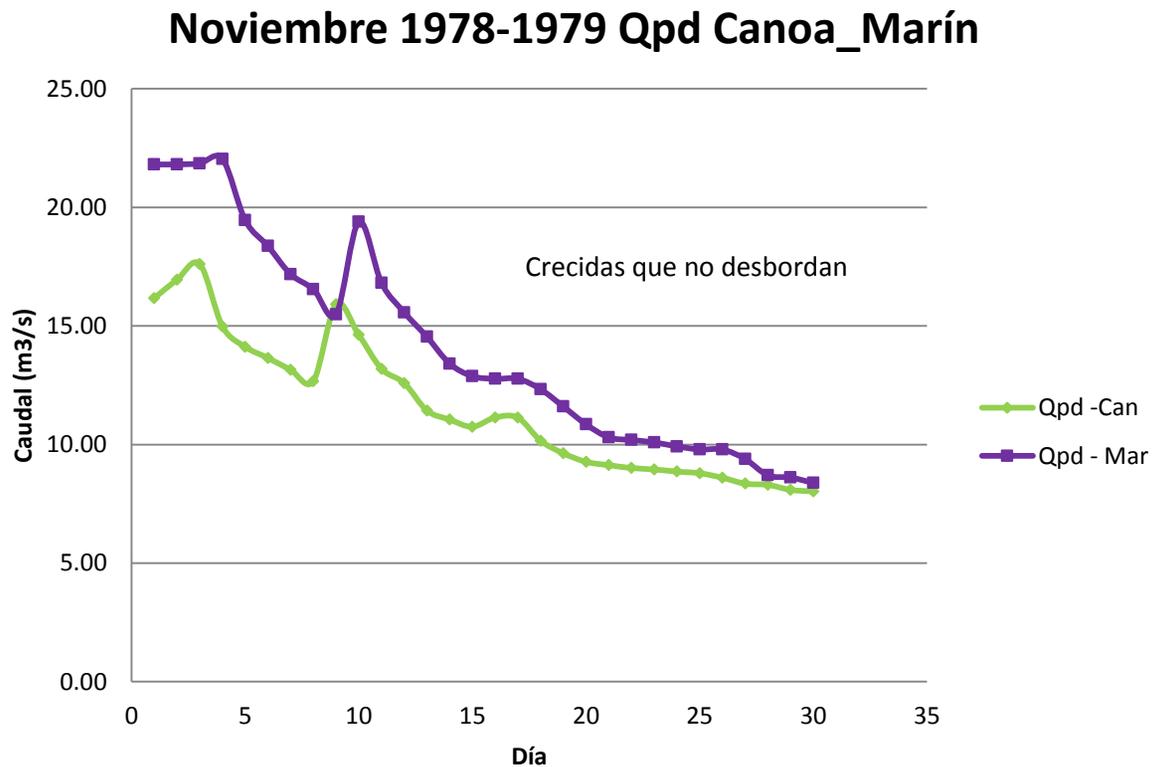
ctubre	1978-1979	
Día	Qpd -Can	Qpd - Mar
1	71.23	108.81
2	53.20	105.38
3	78.73	93.31
4	81.85	87.27
5	53.38	86.12
6	54.03	79.58
7	68.72	72.78
8	40.87	68.54
9	31.18	56.24
10	27.67	46.58
11	25.67	38.59
12	48.89	39.79
13	26.92	44.97
14	61.88	41.05
15	60.65	51.34
16	83.89	56.12
17	96.74	65.85
18	88.17	81.55
19	56.18	91.01
20	38.52	85.36
21	29.84	68.99
22	25.73	49.33
23	23.63	39.76
24	23.18	34.51
25	21.65	32.87
26	20.32	29.88
27	19.99	28.43
28	28.57	30.63
29	20.31	32.00
30	17.80	25.87
31	16.66	23.73
Qpm	45.03	57.94



Como en el mes anterior, al acercarse La Canoa a los 100 m³/s, parece iniciar el comportamiento de planicie de inundación, ya que Vado Marín supera el límite de retención, establecido de momento en 60 m³/s, y retoma la condición de transportar mayor caudal que la estación aguas arriba.

Gráfica 3-6 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, octubre 1978-1979.

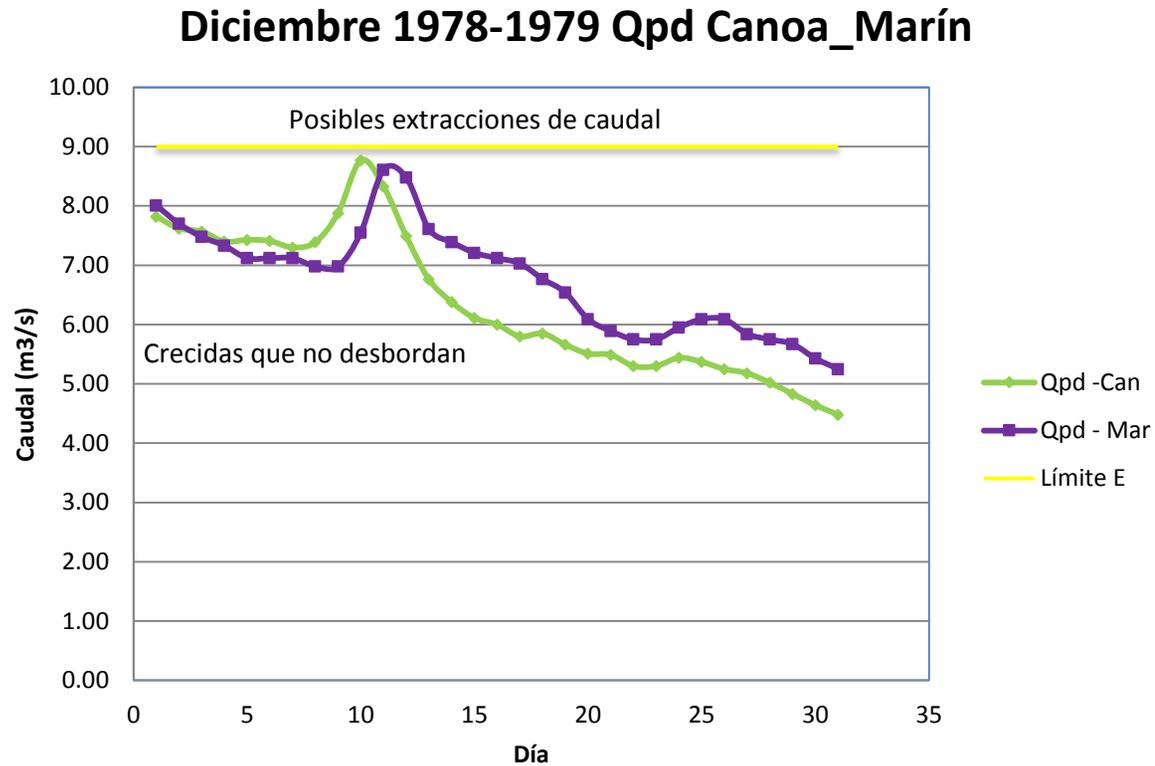
Noviembre	1978-1979	
Día	Qpd -Can	Qpd - Mar
1	16.17	21.81
2	16.95	21.81
3	17.61	21.85
4	14.98	22.04
5	14.12	19.46
6	13.65	18.37
7	13.15	17.18
8	12.67	16.55
9	15.91	15.49
10	14.62	19.39
11	13.19	16.81
12	12.59	15.57
13	11.43	14.54
14	11.05	13.41
15	10.75	12.88
16	11.14	12.77
17	11.13	12.77
18	10.16	12.33
19	9.63	11.60
20	9.27	10.85
21	9.13	10.30
22	9.01	10.19
23	8.95	10.09
24	8.86	9.92
25	8.79	9.79
26	8.60	9.79
27	8.35	9.39
28	8.30	8.70
29	8.09	8.61
30	8.02	8.38
Qpm	11.54	14.09



Se observa un desfase de un día entre los picos de caudal que registran ambas estaciones.

Gráfica 3-7 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, noviembre 1978-1979.

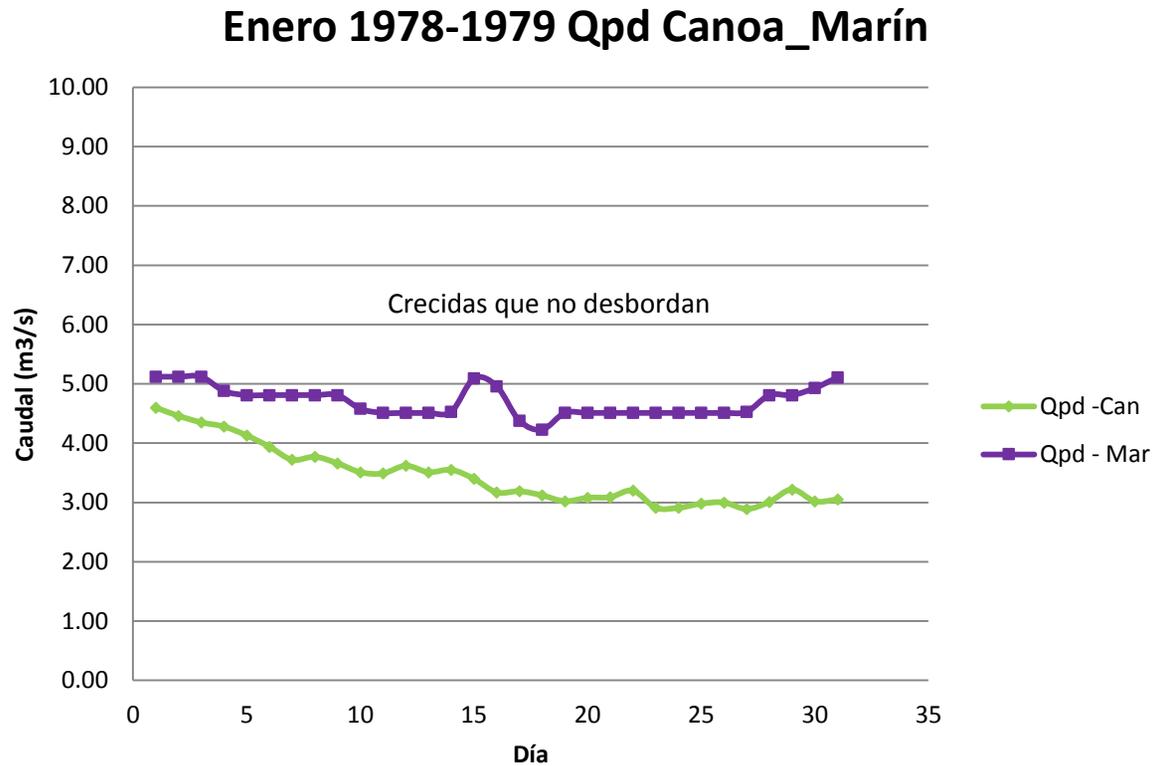
Diciembre	1978-1979	
Día	Qpd - Can	Qpd - Mar
1	7.82	8.01
2	7.62	7.70
3	7.57	7.48
4	7.40	7.33
5	7.43	7.12
6	7.41	7.12
7	7.30	7.12
8	7.39	6.98
9	7.88	6.98
10	8.77	7.55
11	8.33	8.61
12	7.49	8.48
13	6.76	7.61
14	6.38	7.39
15	6.11	7.21
16	6.00	7.12
17	5.80	7.03
18	5.85	6.77
19	5.66	6.54
20	5.51	6.09
21	5.49	5.89
22	5.30	5.75
23	5.30	5.75
24	5.44	5.95
25	5.37	6.09
26	5.25	6.09
27	5.18	5.84
28	5.02	5.75
29	4.83	5.67
30	4.64	5.43
31	4.48	5.25
Qpm	6.35	6.76



Se tiene un desfase de un día entre los picos de caudal que registran ambas estaciones. Además se observa que La Canoa alcanza el caudal de Vado Marín, sin embargo estos registros pertenecen al inicio de la época seca y son originados por el caudal base, de modo que se descarta un desborde hacia la laguna, y se considerará como extracciones de agua para regadío de cultivos.

Gráfica 3-8 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, diciembre 1978-1979.

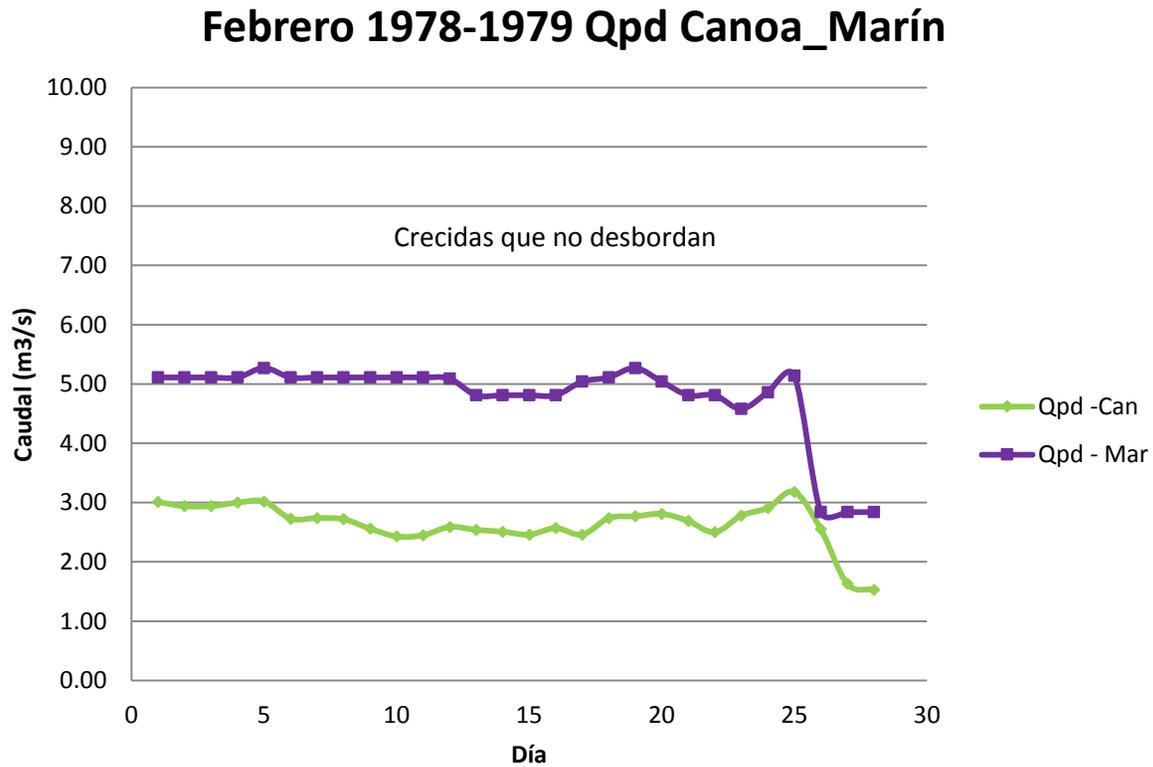
Enero	1978-1979	
Día	Qpd - Can	Qpd - Mar
1	4.60	5.12
2	4.46	5.12
3	4.35	5.12
4	4.28	4.88
5	4.13	4.81
6	3.94	4.81
7	3.72	4.81
8	3.77	4.81
9	3.66	4.81
10	3.51	4.58
11	3.49	4.51
12	3.62	4.51
13	3.51	4.51
14	3.55	4.53
15	3.40	5.09
16	3.17	4.96
17	3.19	4.38
18	3.12	4.23
19	3.02	4.51
20	3.08	4.51
21	3.09	4.51
22	3.20	4.51
23	2.91	4.51
24	2.91	4.51
25	2.98	4.51
26	3.00	4.51
27	2.89	4.53
28	3.01	4.81
29	3.22	4.81
30	3.02	4.93
31	3.05	5.11
Qpm	3.45	4.71



Comportamiento normal.

Gráfica 3-9 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, enero 1978-1979.

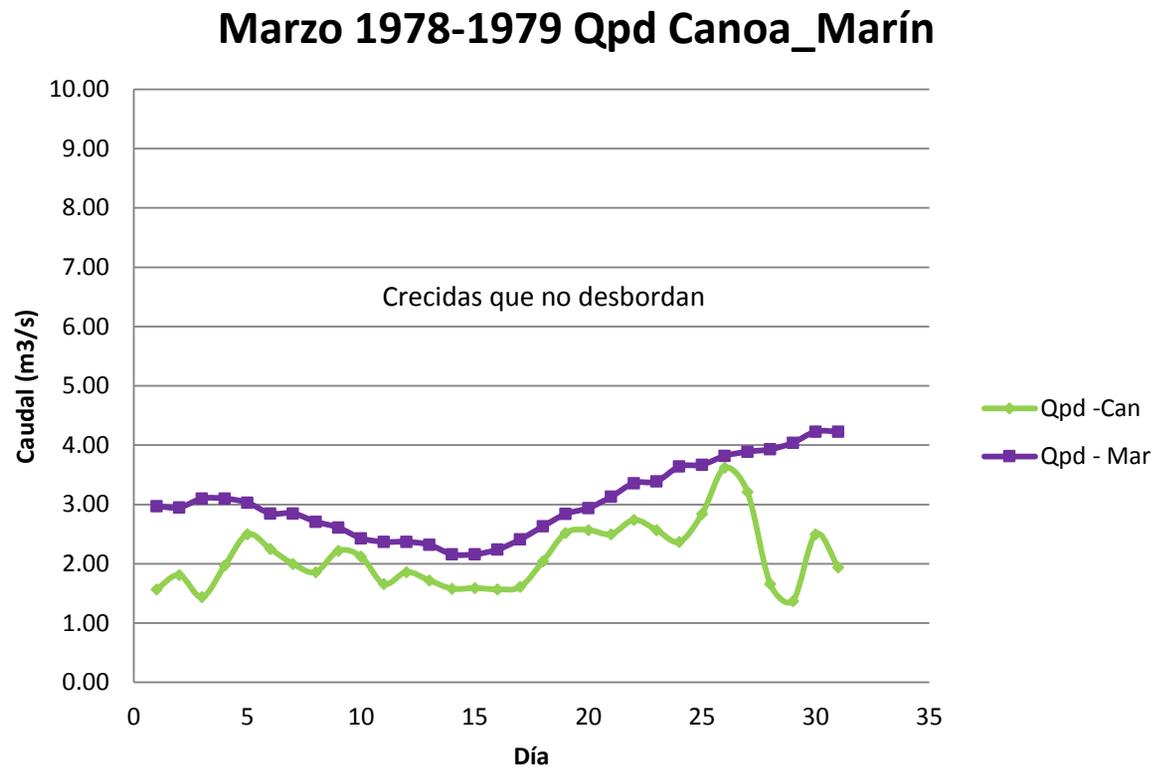
Febrero	1978-1979	
Día	Qpd -Can	Qpd - Mar
1	3.01	5.11
2	2.94	5.11
3	2.94	5.11
4	3.00	5.11
5	3.02	5.27
6	2.73	5.11
7	2.74	5.11
8	2.72	5.11
9	2.56	5.11
10	2.43	5.11
11	2.45	5.11
12	2.59	5.09
13	2.54	4.81
14	2.51	4.81
15	2.46	4.81
16	2.57	4.81
17	2.46	5.04
18	2.74	5.11
19	2.77	5.27
20	2.81	5.04
21	2.69	4.81
22	2.50	4.81
23	2.78	4.58
24	2.91	4.86
25	3.18	5.14
26	2.55	2.84
27	1.63	2.84
28	1.53	2.84
Qpm	2.63	4.78



Comportamiento normal

Gráfica 3-10 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, febrero 1978-1979.

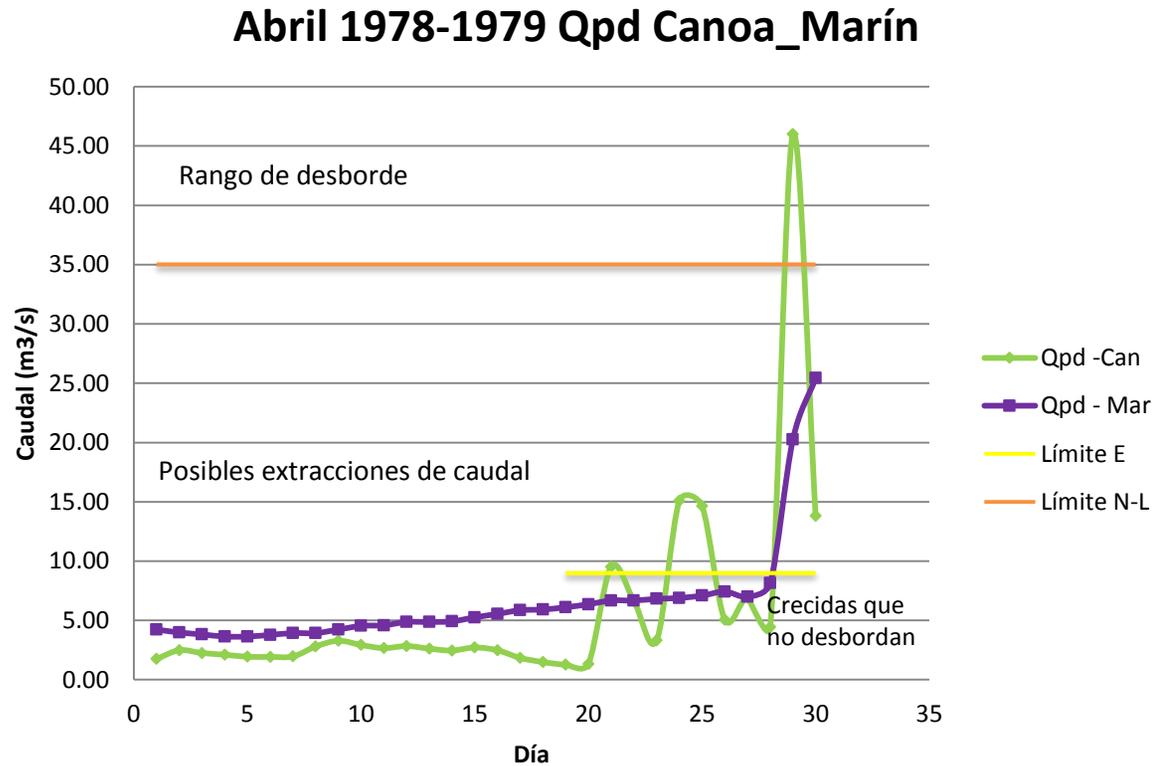
Marzo	1978-1979	
Día	Qpd -Can	Qpd - Mar
1	1.57	2.97
2	1.81	2.95
3	1.44	3.10
4	1.97	3.10
5	2.50	3.03
6	2.25	2.85
7	2.00	2.85
8	1.86	2.71
9	2.22	2.61
10	2.12	2.43
11	1.66	2.37
12	1.86	2.37
13	1.72	2.32
14	1.58	2.16
15	1.59	2.16
16	1.57	2.24
17	1.61	2.41
18	2.04	2.63
19	2.52	2.84
20	2.57	2.94
21	2.50	3.13
22	2.74	3.36
23	2.57	3.39
24	2.37	3.64
25	2.84	3.67
26	3.62	3.82
27	3.21	3.89
28	1.66	3.93
29	1.37	4.04
30	2.50	4.23
31	1.94	4.23
Qpm	2.12	3.04



Comportamiento normal

Gráfica 3-11 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, marzo 1978-1979.

Abril	1978-1979	
Día	Qpd - Can	Qpd - Mar
1	1.75	4.23
2	2.49	3.98
3	2.25	3.82
4	2.11	3.64
5	1.94	3.64
6	1.93	3.78
7	1.96	3.93
8	2.80	3.93
9	3.29	4.23
10	2.93	4.54
11	2.66	4.59
12	2.84	4.87
13	2.62	4.87
14	2.46	4.92
15	2.72	5.26
16	2.48	5.55
17	1.84	5.86
18	1.49	5.92
19	1.27	6.11
20	1.34	6.36
21	9.53	6.68
22	6.65	6.68
23	3.31	6.82
24	15.08	6.89
25	14.65	7.09
26	5.06	7.43
27	6.93	7.00
28	4.43	8.15
29	46.01	20.26
30	13.80	25.43
Qpm	5.69	6.55



Es la transición de la época seca a la lluviosa. En estos registros podemos observar el límite de extracciones (Límite E) que no tiene un valor fijo, y el límite de aportación a la Laguna (Límite N-L) tal vez causado por un evento lluvioso a final del mes.

Gráfica 3-12 Caudal Promedio Diario La Canoa y Vado Marín, abril 1978-1979.

Al hacer el análisis anterior para todo el registro y graficar los máximos Qpd de Vado Marín contra los de la Canoa se tiene:

Tabla 3-8 Relación de Máximos Caudales Promedios Diarios, La Canoa - Vado Marín 1977-1978.

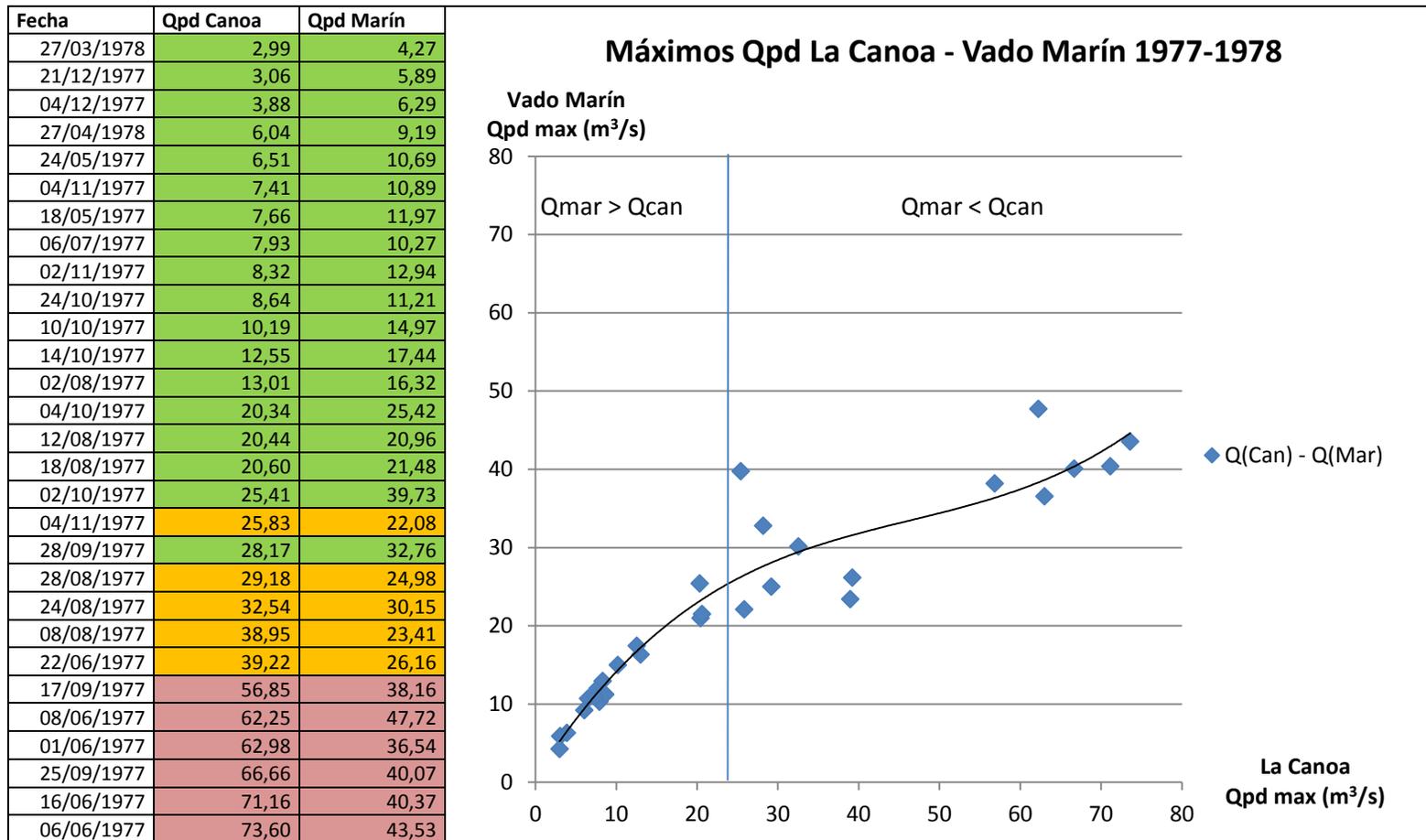


Tabla 3-9 Relación de Máximos Caudales Promedios Diarios, La Canoa - Vado Marín 1978-1979.

Fecha	Qpd Canoa	Qpd Marín
25/02/1979	3,18	5,14
15/06/1978	7,33	9,86
13/08/1978	8,99	13,34
22/06/1978	11,34	15,08
02/06/1978	12,77	20,84
09/11/1978	15,91	19,39
29/05/1978	16,66	18,58
03/11/1978	17,61	22,04
05/06/1978	19,54	23,65
07/06/1978	20,00	29,50
20/05/1978	24,52	28,74
31/07/1978	26,58	36,18
22/08/1978	28,49	31,70
28/10/1978	28,57	32,00
02/07/1978	31,38	34,03
28/07/1978	32,12	40,80
05/08/1978	34,82	33,90
05/07/1978	35,20	34,65
19/08/1978	35,57	31,02
09/08/1978	36,79	37,78
29/04/1979	46,01	25,43
12/10/1978	48,89	44,97
21/07/1978	49,63	52,35
17/07/1978	50,17	48,75
14/07/1978	63,55	48,43
07/10/1978	68,72	68,54
25/08/1978	70,00	42,91
04/10/1978	81,85	86,12
31/08/1978	92,00	84,71
17/10/1978	96,74	91,01
07/09/1978	99,04	106,22
21/09/1978	112,84	132,79

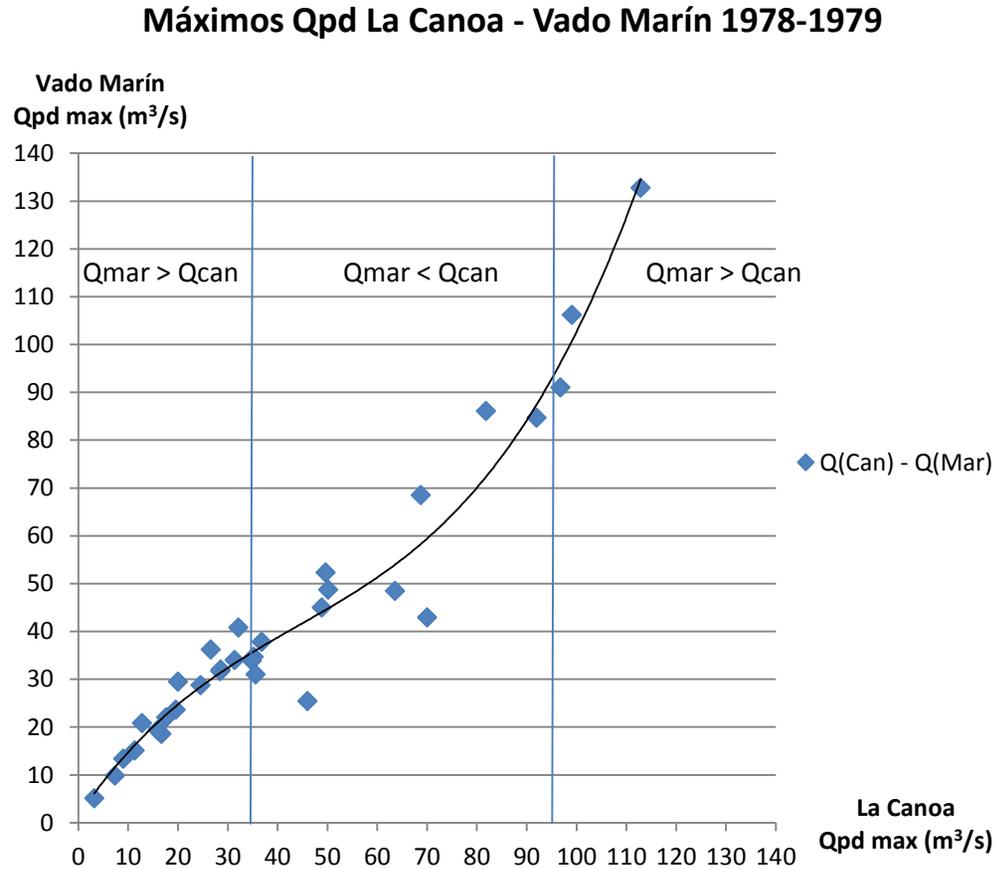


Tabla 3-10 Relación de Máximos Caudales Promedios Diarios, La Canoa - Vado Marín 1979-1980.

Fecha	Qpd Canoa	Qpd Marín
29/04/1980	4,24	11,72
12/05/1979	5,27	10,39
04/05/1979	8,37	16,49
14/05/1979	10,44	22,23
24/06/1979	19,71	33,10
19/07/1979	23,96	31,82
22/07/1979	30,99	42,62
02/06/1979	44,85	46,65
08/06/1979	53,74	55,89
02/08/1979	86,89	56,47
27/07/1979	89,39	54,40
04/08/1979	90,97	59,57
15/06/1979	93,30	62,20
12/07/1979	98,77	63,59
05/06/1979	109,46	62,58
03/10/1979	114,21	82,16
04/07/1979	116,04	88,51
06/07/1979	116,87	88,27
27/09/1979	119,00	75,48
22/08/1979	122,92	73,03
02/07/1979	133,89	80,21
03/11/1979	134,65	67,41
04/09/1979	152,80	124,36
13/09/1979	162,81	142,17
20/10/1979	166,00	107,20
09/10/1979	178,57	111,63

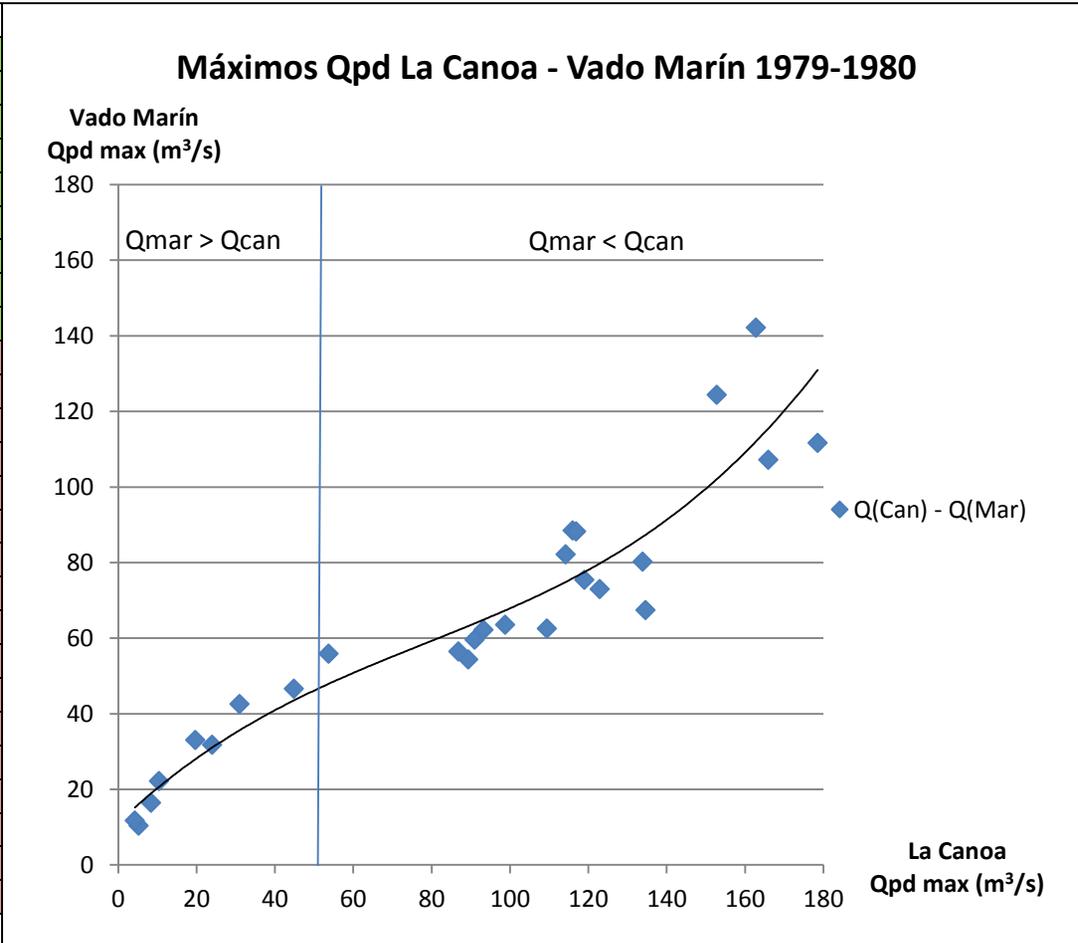
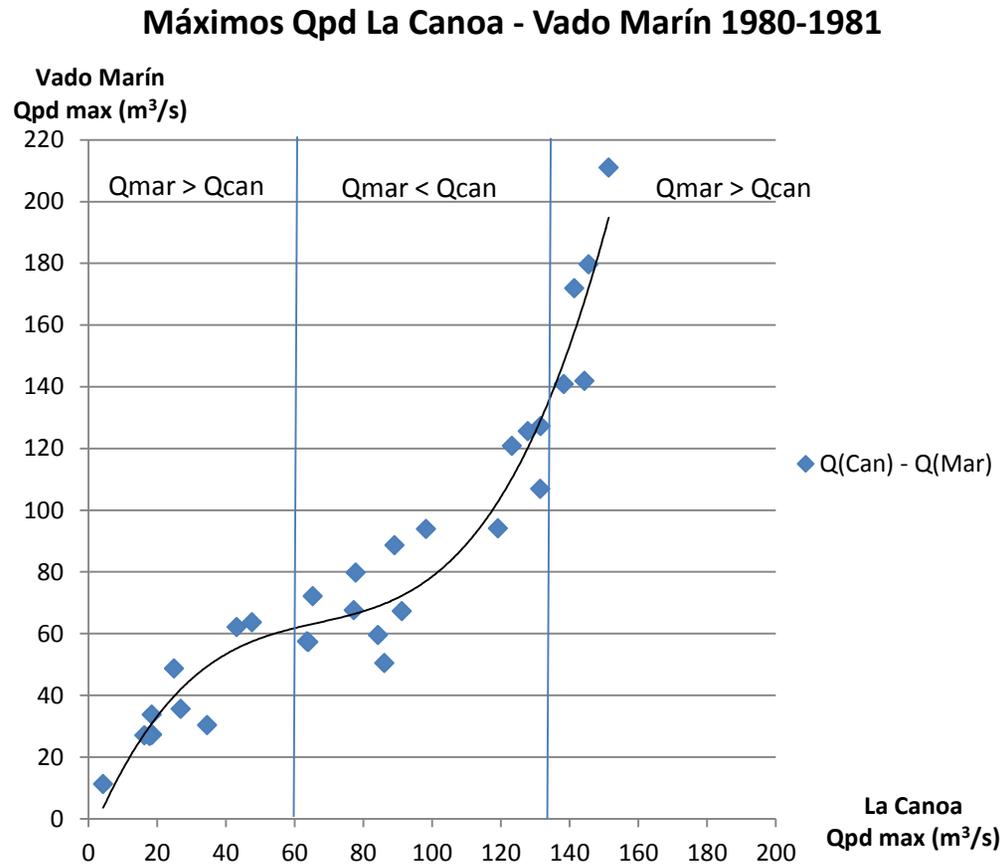


Tabla 3-11 Relación de Máximos Caudales Promedios Diarios, La Canoa - Vado Marín 1980-1981.

Fecha	Qpd Canoa	Qpd Marín
23/03/1981	3,94	10,88
21/03/1981	4,33	11,28
09/07/1980	16,30	27,08
16/11/1980	17,78	26,90
15/05/1980	18,43	33,80
13/11/1980	18,46	27,26
13/07/1980	18,59	27,39
30/08/1980	24,89	48,81
05/11/1980	26,88	35,66
24/05/1980	34,59	30,37
12/08/1980	43,15	62,20
31/07/1980	47,57	63,78
05/06/1980	63,66	57,55
09/06/1980	63,97	57,39
28/07/1980	65,31	72,18
02/08/1980	77,23	67,66
30/05/1980	77,78	79,89
21/07/1980	84,28	59,61
28/05/1980	86,15	50,50
20/09/1980	89,06	88,67
07/08/1980	91,17	67,40
23/09/1980	98,29	94,01
24/07/1980	119,19	94,20
21/08/1980	123,25	120,95
28/09/1980	127,89	125,63
16/08/1980	131,46	106,96
13/09/1980	131,56	127,32
04/10/1980	138,33	140,96
07/10/1980	141,39	172,01
13/06/1980	144,36	141,98
11/10/1980	145,54	179,75
22/06/1980	151,37	211,13

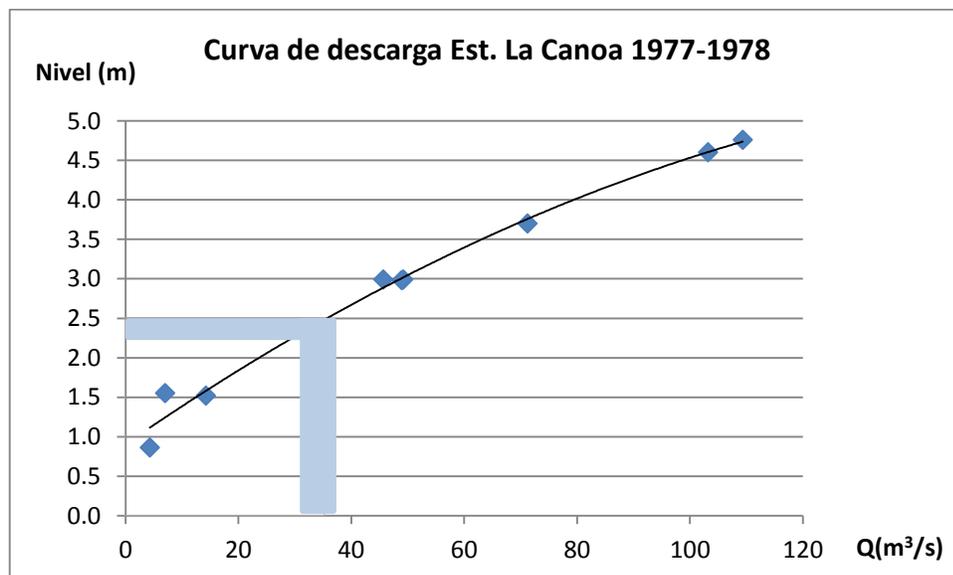


A nivel general se observa una relación cúbica entre ambas estaciones, que puede ser dividida en tres etapas:

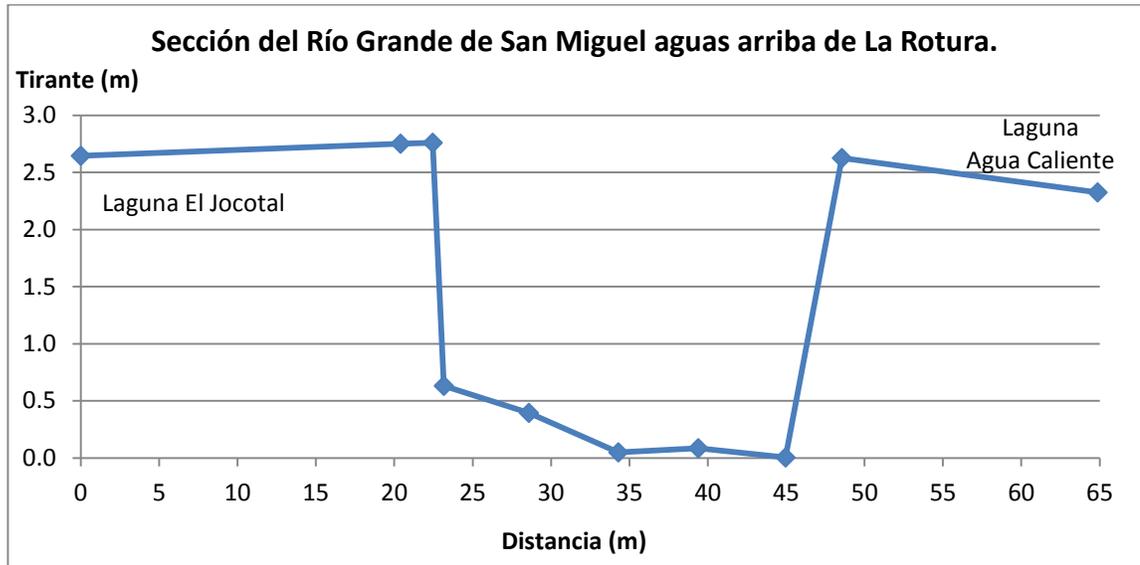
- Etapa 1: Vado Marín registra mayor caudal que La Canoa. Esto corresponde al comportamiento "Normal".
- Etapa 2: Vado Marín registra menor caudal que La Canoa. Esto corresponde a los comportamientos de "Laguna" y "Retención".
- Etapa 3: Vado Marín registra nuevamente mayor caudal que La Canoa. Esto corresponde al comportamiento de "Planicie".

Observamos que los límites varían durante el período analizado, esto podría deberse a bordas que según los guarda recursos, se construyeron en la década de los 70's antes de la reforma agraria, a partir de la cual se descontinuaron y no se volvieron a construir.

El límite cuya variación es menor año con año es el de aportación a la laguna que establecemos entre 30-35 m³/s; ahora, si aplicamos la curva de descarga de la estación La Canoa para este rango, obtenemos un nivel de 2.25 a 2.50 m, que coincide con el tirante máximo de la sección del Río Grande de San Miguel al sur de la laguna.



Gráfica 3-13 Curva de descarga Estación La Canoa 1977-1978.



Gráfica 3-14 Sección del Río Grande de San Miguel aguas arriba de La Rotura.

Hasta este punto se ha logrado definir gran parte de la influencia de Laguna El Jocotal en las avenidas del Río Grande de San Miguel que se dieron durante la década de los 70's, sin embargo aún hace falta determinar si estas condiciones se mantienen, y dar una explicación al comportamiento de "Extracción", ya que el significado asumido no es del todo satisfactorio, pues es muy poco probable que extracciones para regadíos generen pérdidas tan grandes en el caudal del RGSM.

Para determinar si las condiciones se mantienen, se hace el análisis de las estaciones actuales que registran niveles a cada 15 minutos, y para explicar el comportamiento de extracciones se estudió el índice de sinuosidad, pues este podría deberse a una atenuación del hidrograma generada por las condiciones de poca pendiente y fuertes meandros que presenta el RGSM en este tramo.

3.4.2. Análisis del registro de niveles de las estaciones actuales.

Los análisis que se realizaron son las relaciones de Nivel Máximo y Tiempo de tránsito para las estaciones Villerías, El Delirio y Vado Marín durante el año 2006 y Villerías, La Canoa y Vado Marín durante el año 2012, pues por su disponibilidad de información son los dos únicos años en que las estaciones funcionan simultáneamente.

Relación Nivel Máximo: Correlaciona el nivel máximo alcanzado por una crecida aguas arriba, con el nivel máximo alcanzado por la misma crecida en la estación aguas abajo; de modo que al analizar varias crecidas, se obtenga una nube de dispersión con una tendencia definida.

Relación Tiempo de tránsito: Correlaciona el nivel máximo alcanzado por una crecida aguas arriba, con el tiempo que esta toma para alcanzar el nivel máximo en una estación aguas abajo; de modo que al analizar varias crecidas, se obtenga una nube de dispersión con una tendencia definida.

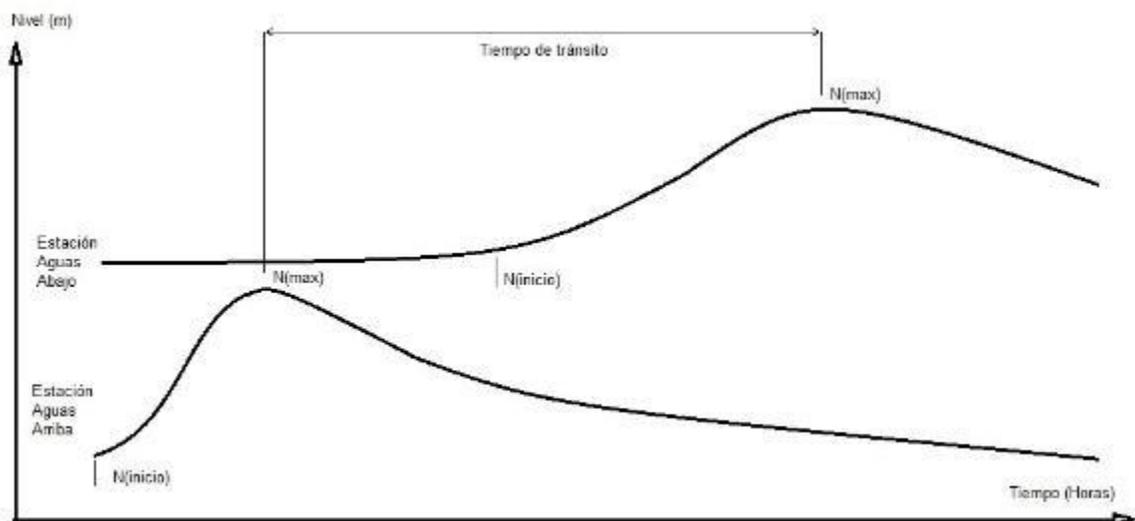


Imagen 3-25 Variables a considerar para obtener las relaciones de nivel máximo y tiempo de tránsito.

Para nuestra investigación estas relaciones de nivel y tiempo de tránsito entre La Canoa – Vado Marín, indican en qué medida las crecidas registradas en la estación La Canoa se modifican por efecto de la laguna, según cómo se registren en la estación Vado Marín; sin embargo, también es necesario establecer el comportamiento natural para distinguir anomalías en los niveles del Río Grande de San Miguel. Para establecer esta tendencia, se analizaron las relaciones de nivel máximo y tiempo de tránsito entre las estaciones Villerías y La Canoa, para los años 2006⁵ y 2012, pues ya que no se han tenido desbordes del Río Grande de San Miguel hacia la Laguna de Olomega, o estos han sido muy pocos, estas relaciones establecerían el comportamiento normal del RGSM, que se comparó con el obtenido entre las estaciones cercanas a la Laguna El Jocotal.

⁵ Para el año 2006 se utilizará la estación El Delirio.

**3.4.2.1. Relación de niveles máximos y de tiempo de tránsito:
Villerías – El Delirio y Villerías – La Canoa.**

Estación	Altitud (msnm)	Distancia en el cauce (Km)
Villerías	90.40	
El Delirio	44.73	Villerías – El Delirio: 46.0
La Canoa	34.10	Villerías – La Canoa: 48.6

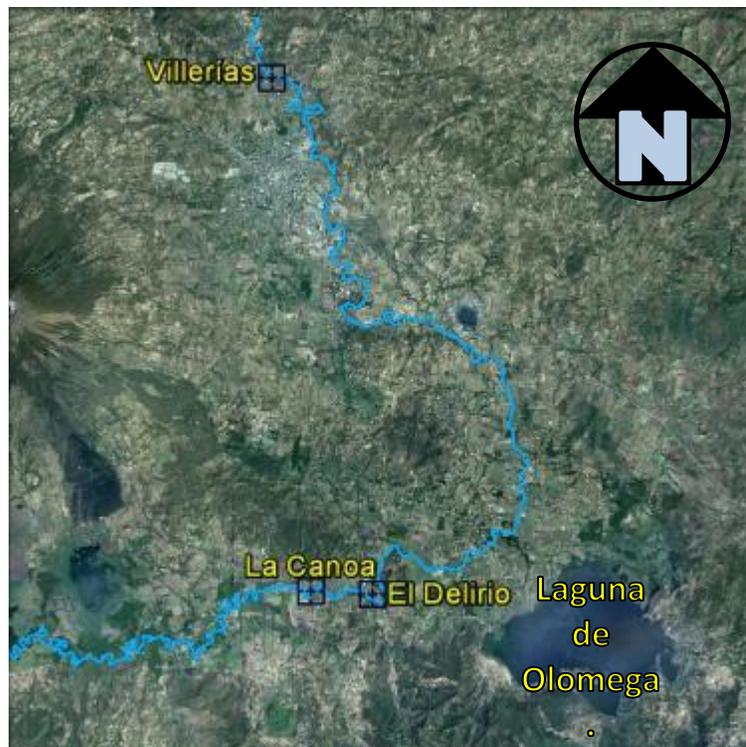
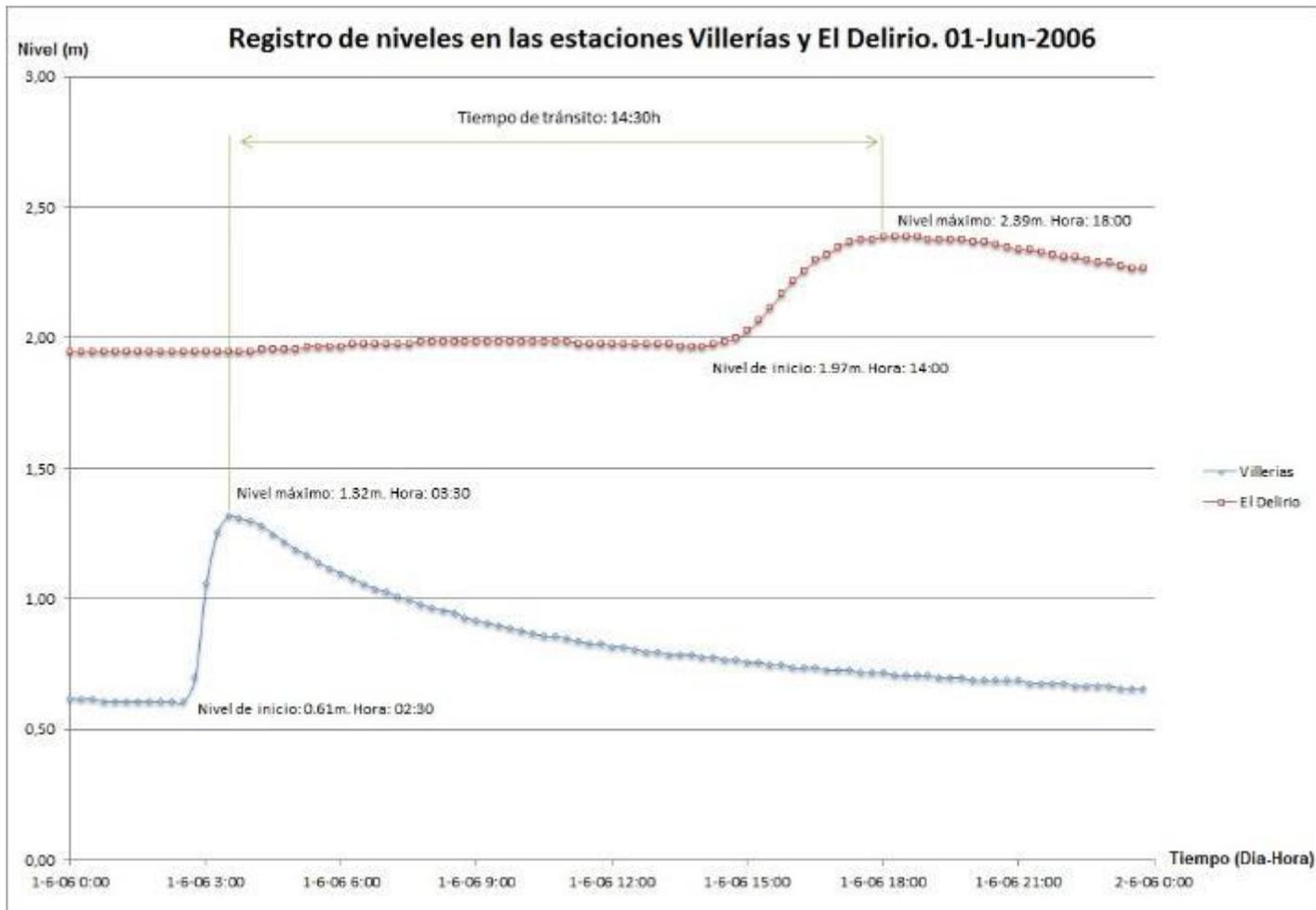


Imagen 3-26 Ubicación de las estaciones Villerías, El Delirio y La Canoa.

Para este análisis es necesario hacer un gráfico por día con los niveles registrados a cada 15 minutos por cada pareja de estaciones hidrométricas, como se muestra a continuación.

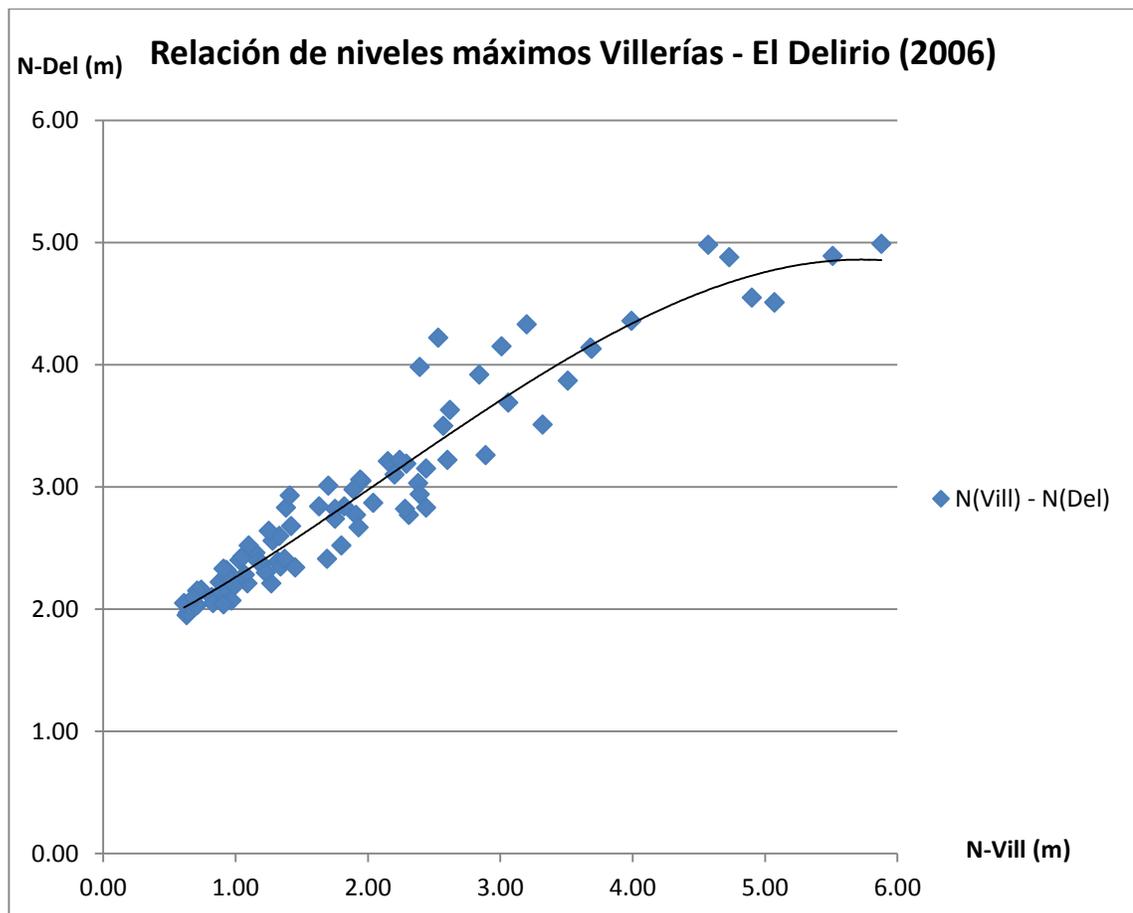


Gráfica 3-15 Registro de niveles Villerías – El Delirio 2006.

Se realizó este procedimiento para todos los días que tuvieran registros en la época lluviosa, la tabla de resultados se puede encontrar en el Anexo 2.

De graficar los niveles máximos de las crecidas en la estación Villerías contra los niveles máximos de las crecidas en la estación El Delirio, se obtiene la relación de niveles máximos que hubo entre ambas estaciones para el año 2006, y se puede apreciar que la relación es coherente ya que tiene una tendencia ascendente definida.

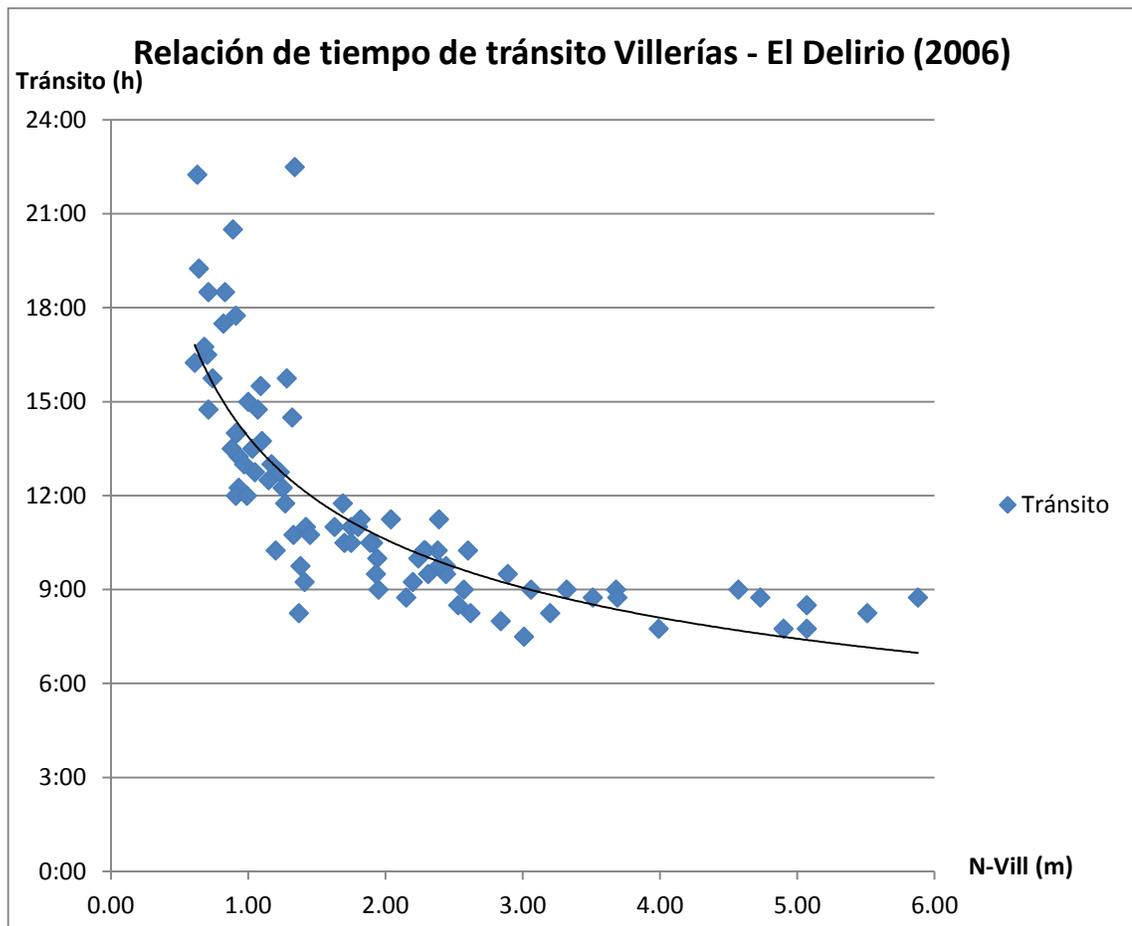
En el gráfico inferior podemos apreciar que en promedio, las crecidas en Villerías superiores a 4.5 m (eje horizontal) generaban desbordamientos, ya que las crecidas de la estación El Delirio alcanzaban un nivel límite de 5 m, sin importar que las crecidas en Villerías continuaran aumentando.



Gráfica 3-16 Relación de niveles máximos Villerías – El Delirio 2006.

Ahora, de graficar los niveles máximos de las crecidas de la estación Villerías, contra el tiempo que estas tardan en alcanzar el nivel máximo en la estación El Delirio, se obtiene la relación Nivel – Tiempo de tránsito que hubo entre ambas estaciones para el año 2006.

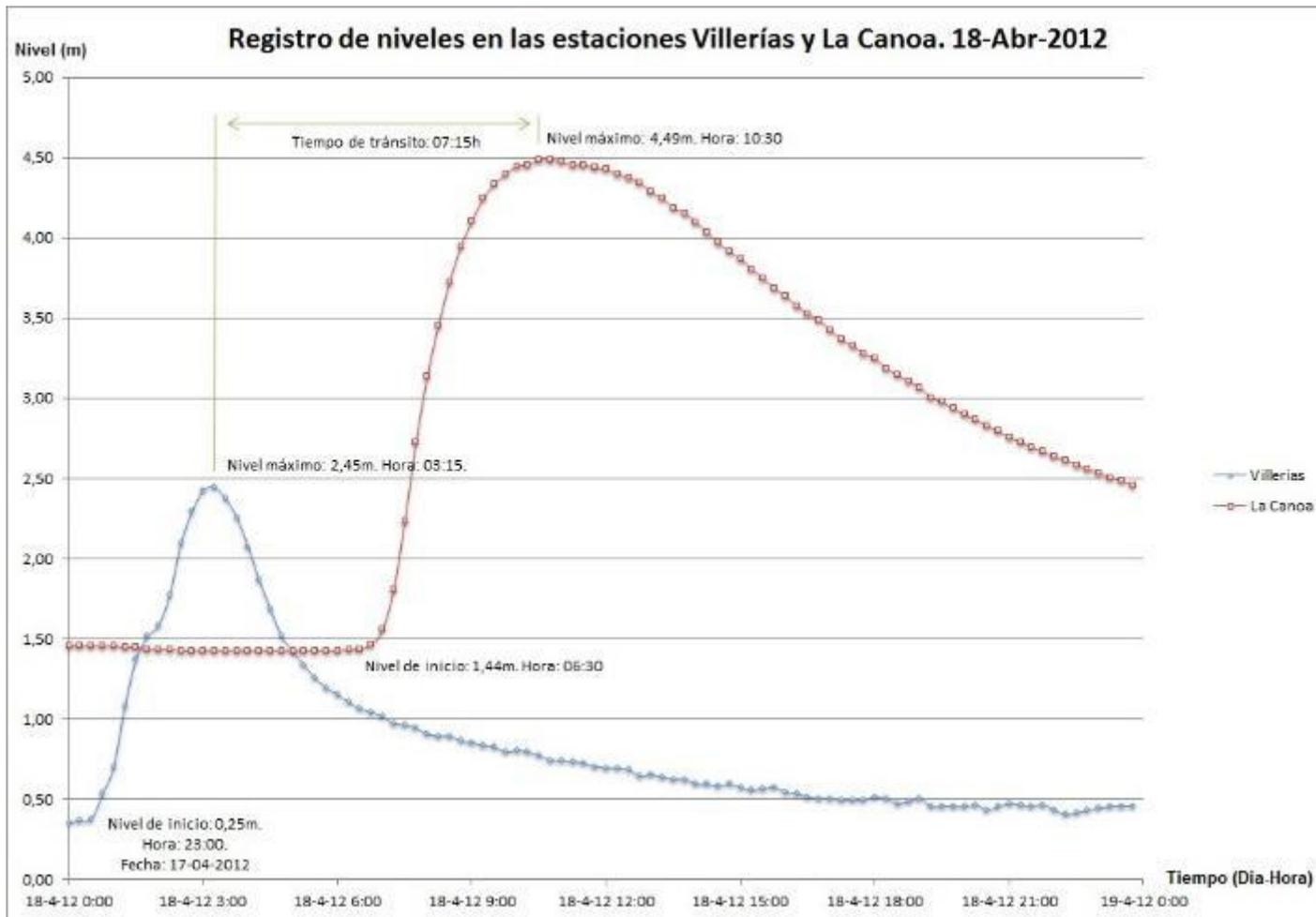
Se puede apreciar que la tendencia es coherente, ya que mientras mayor es la crecida en Villerías, menos tiempo tarda esta en alcanzar su nivel máximo en El Delirio. También se puede observar que una crecida, lo menos que puede tardar en llegar hasta la estación El Delirio son 7:30 h, límite que en promedio se alcanza desde las crecidas de 3 m en adelante.



Gráfica 3-17 Relación de Tiempo de transito Villerías – El Delirio 2006

Esto consideramos que es lo que representa el comportamiento normal de las crecidas en lo que respecta a niveles máximos y tiempos de tránsito, durante su desplazamiento entre las estaciones Villerías y El Delirio.

Este procedimiento se repite para el par de estaciones Villerías – La canoa para el año 2012 como se muestra a continuación.

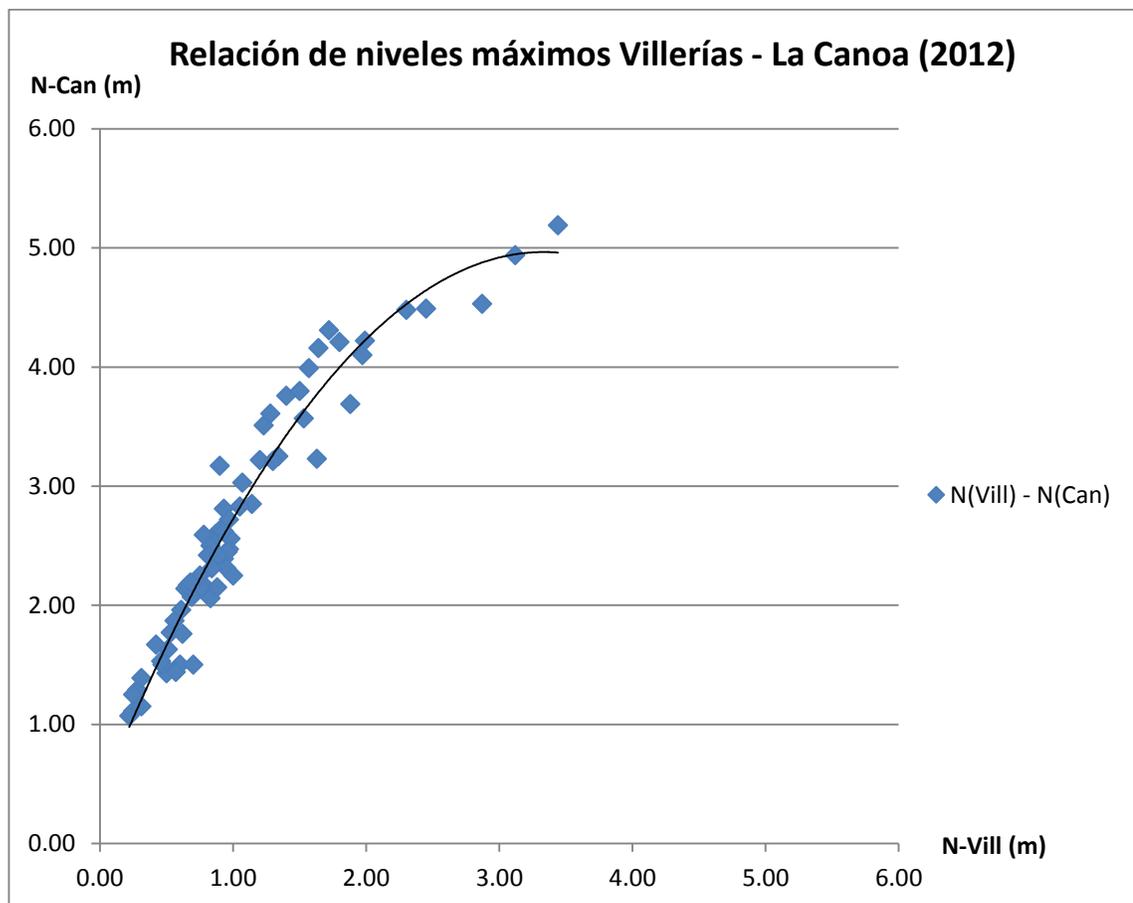


Gráfica 3-18 Registro de niveles Villerías – La Canoa 2012.

Se realizó este procedimiento para todos los días que tuvieran registros en la época lluviosa, la tabla de resultados se puede encontrar en el Anexo 3.

De graficar los niveles máximos de las crecidas de la estación Villerías contra los niveles máximos de las crecidas en la estación La Canoa, se obtiene la relación niveles máximos que existió entre ambas estaciones durante el año 2012.

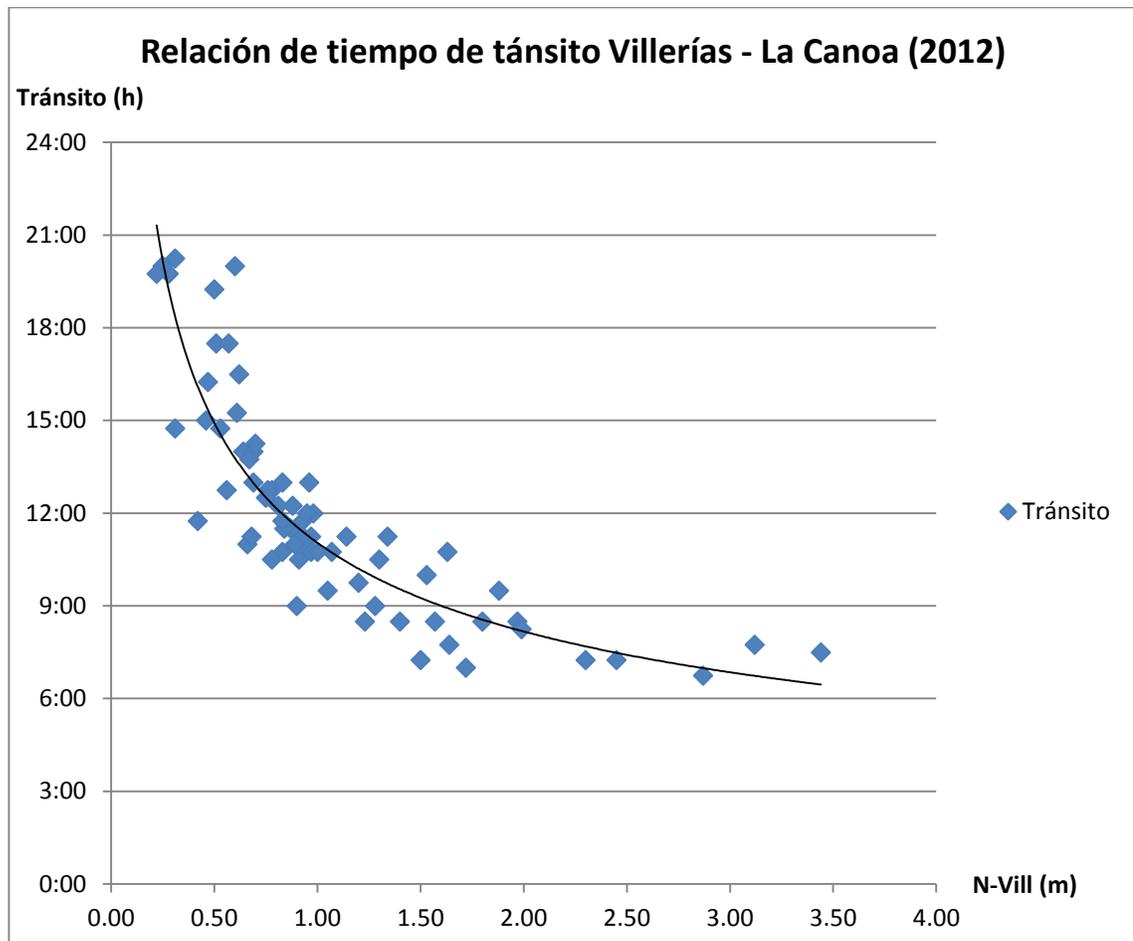
En comparación con la relación de niveles máximos Villerías – El Delirio (2006), esta del 2012 en la estación La Canoa es más pronunciada, es decir, leves incrementos en la estación Villerías (eje horizontal) producen grandes incrementos en la estación La Canoa (eje vertical), esto se puede deber a que La Canoa se ubica donde inicia el valle formado por el Volcán de San Miguel y los Cerros de Jucuarán, que es una zona de leves pendientes tipo planicie. De modo que luego de transitar las crecidas por El Delirio, que es una zona de fuertes pendientes, al llegar a la zona de planicie se produce un remanso en el flujo del Río Grande de San Miguel, que propicia un resalto hidráulico mayor que el que se produce en la estación El Delirio.



Gráfica 3-19 Relación de niveles máximos Villerías – La Canoa 2012.

Sin embargo, a pesar de lo dicho anteriormente, se puede apreciar cómo esta relación de niveles es similar a la relación que se tenía en el año 2006, por lo que también se puede tipificar como un comportamiento “normal” del Río Grande de San Miguel.

La relación de tiempo de tránsito obtenida para este par de estaciones es la siguiente.



Gráfica 3-20 Relación de tiempo de transito Villerías – La Canoa 2012.

Esta relación es muy similar a la obtenida entre las estaciones Villerías – El Delirio (2006), de modo que también consideraremos que se encuentra dentro del comportamiento normal del Río Grande de San Miguel.

3.4.2.2. Relación de niveles máximos y de tiempo de tránsito El Delirio – Vado Marín y La Canoa – Vado Marín.

Estación	Altitud (msnm)	Distancia en el cauce (Km)
El Delirio	44.73	El Delirio – V. Marín: 33.30
La Canoa	34.10	La Canoa – V. Marín: 30.70
Vado Marín	20.10	

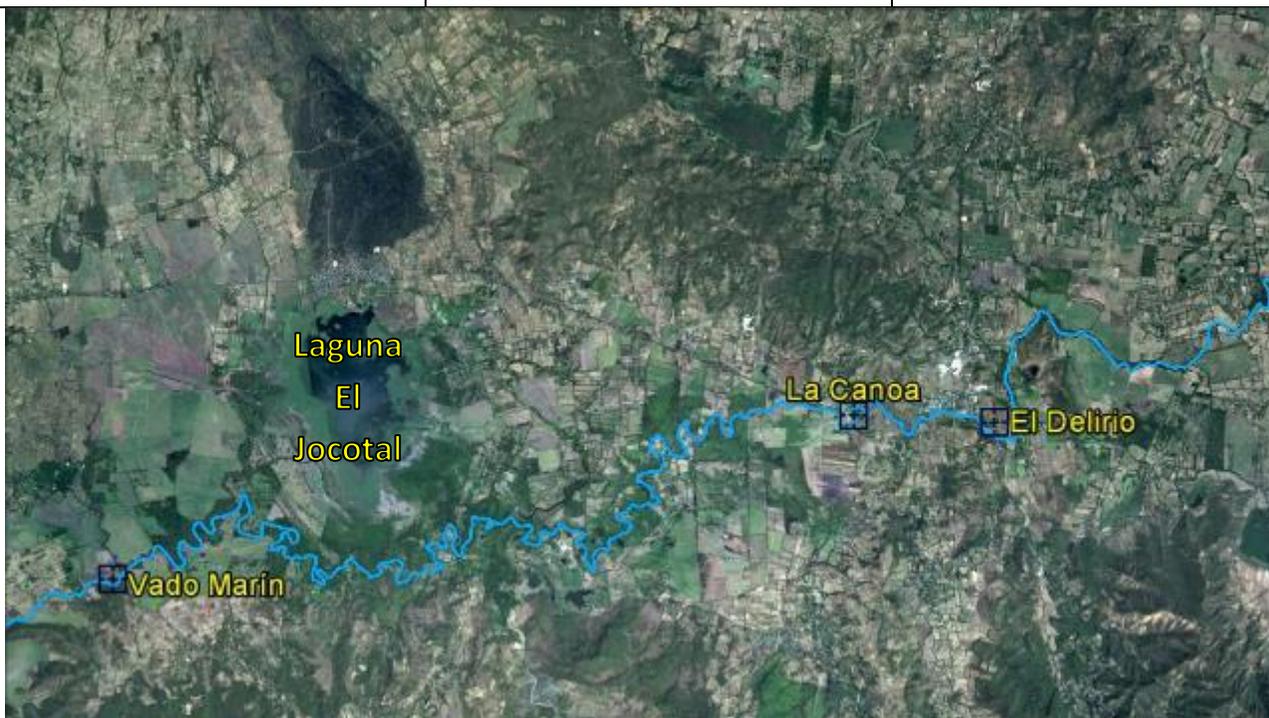
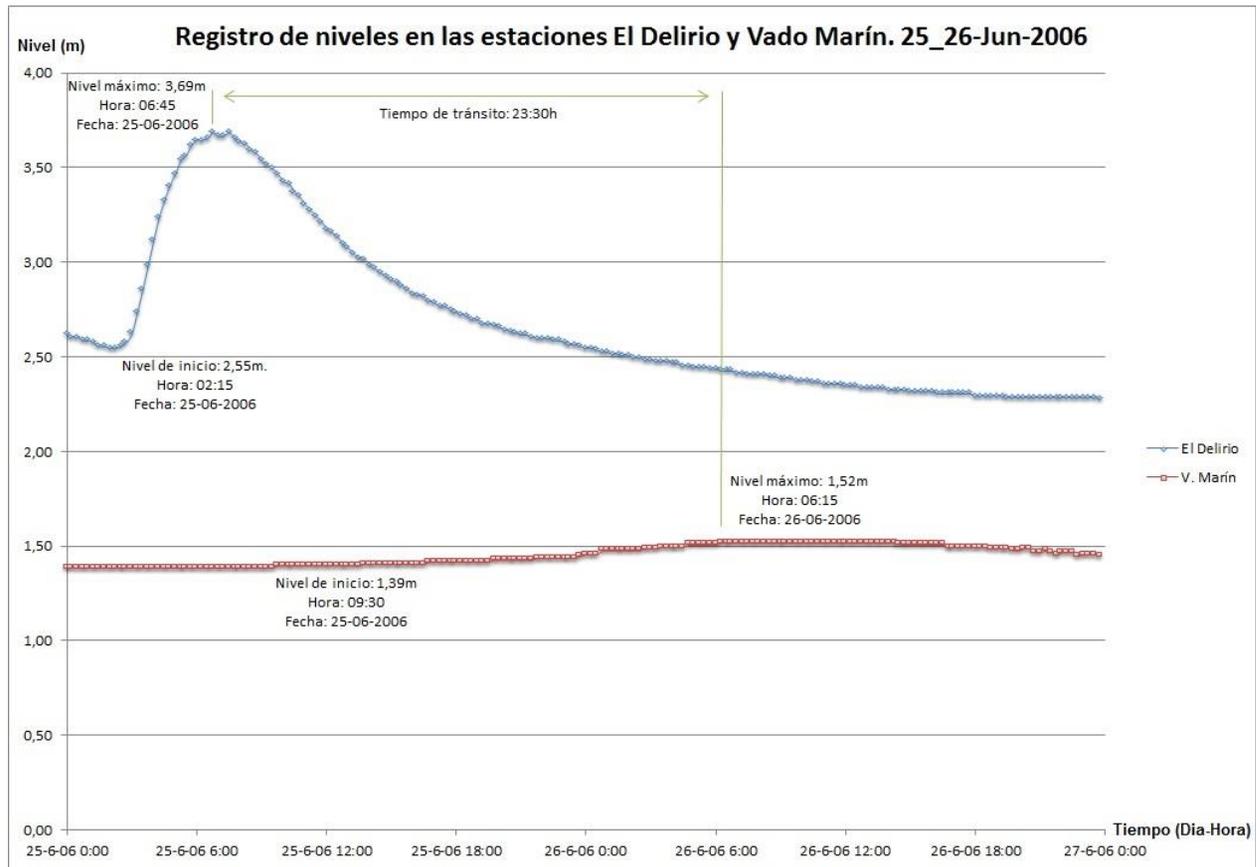
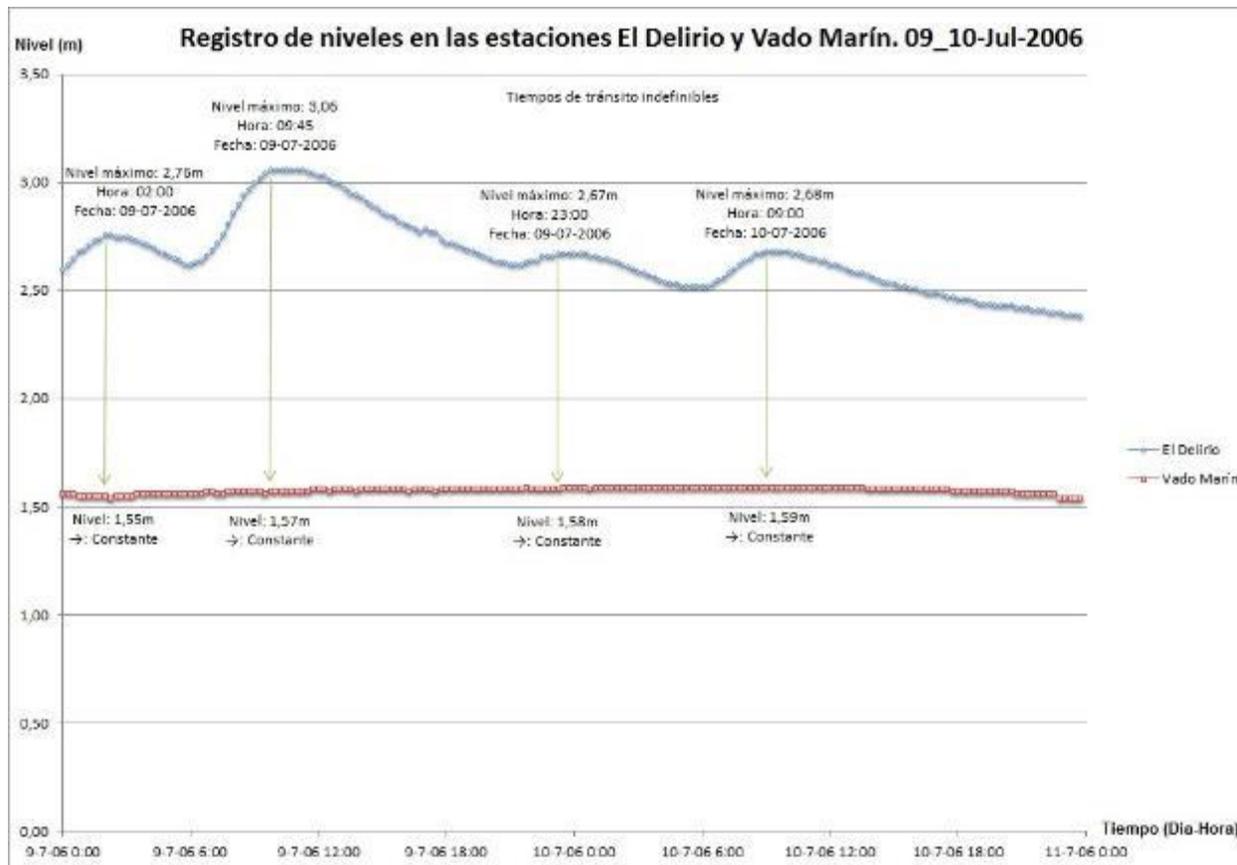


Imagen 3-27 Ubicación de las estaciones El Delirio, La Canoa y Vado Marín.



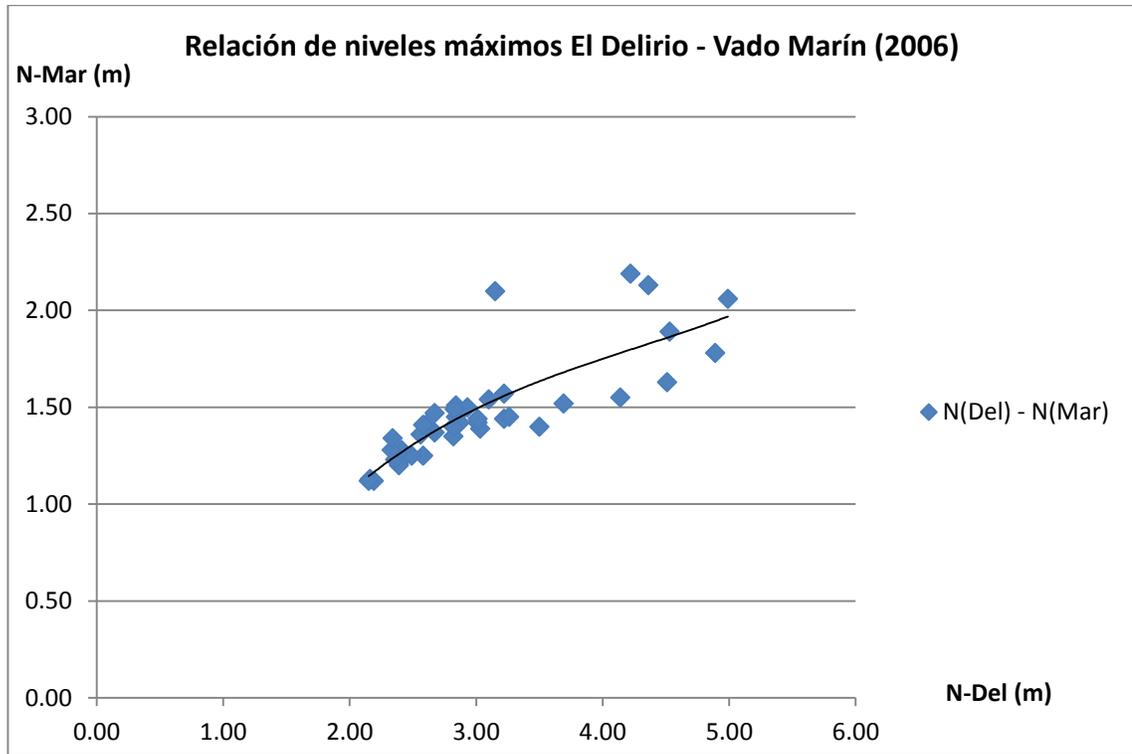
Gráfica 3-21 Registro de niveles El Delirio – Vado Marín 2006.

Se realizó este procedimiento para todos los días que tuvieran registros en la época lluviosa, la tabla de resultados se puede encontrar en el Anexo 4. Para algunas de las crecidas registradas en la estación El Delirio, no se pudo asociar su tiempo de tránsito en la estación Vado Marín. Un ejemplo de estas se muestra a continuación:



Gráfica 3-22 Registro de niveles 09-10 de Julio de 2006 El Delirio – Vado Marín.

La relación de niveles máximos obtenida es la siguiente:



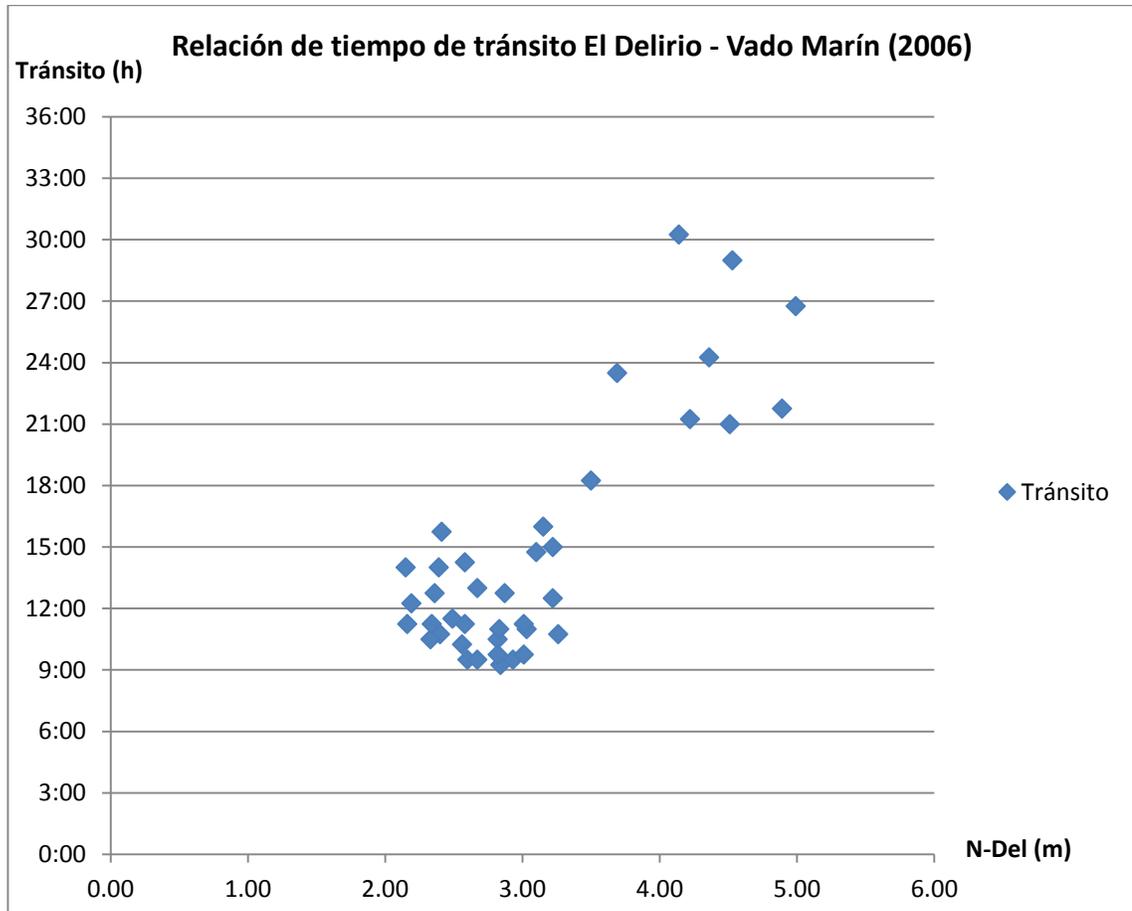
Gráfica 3-23 Relación de niveles máximos El Delirio – Vado Marín 2006.

En comparación con las relaciones de niveles máximos Villerías – El Delirio (2006) y Villerías – La Canoa (2012), esta tiende a ser bastante aplanada, es decir, grandes crecidas en la estación El Delirio (eje horizontal) producen leves crecidas en la estación Vado Marín (eje vertical). Esto puede deberse al efecto que tiene la laguna en amortiguar las crecidas.

Otro aspecto importante es que esta curva es similar a la que se obtuvo del análisis de Qpd máximos para el año hidrológico 77-78; en ésta de nivel, una crecida de 5 m en El Delirio genera aproximadamente una de 2m en Vado Marín, mientras que en la de Qpd máximo, un caudal de 80 m³/s en La Canoa producía aproximadamente uno de 40 m³/s en Vado Marín.

Esto nos permite establecer que estas curvas representan parte de la interacción de la laguna con el río, indicando que amortigua hasta en un 50 % las crecidas registradas aguas arriba.

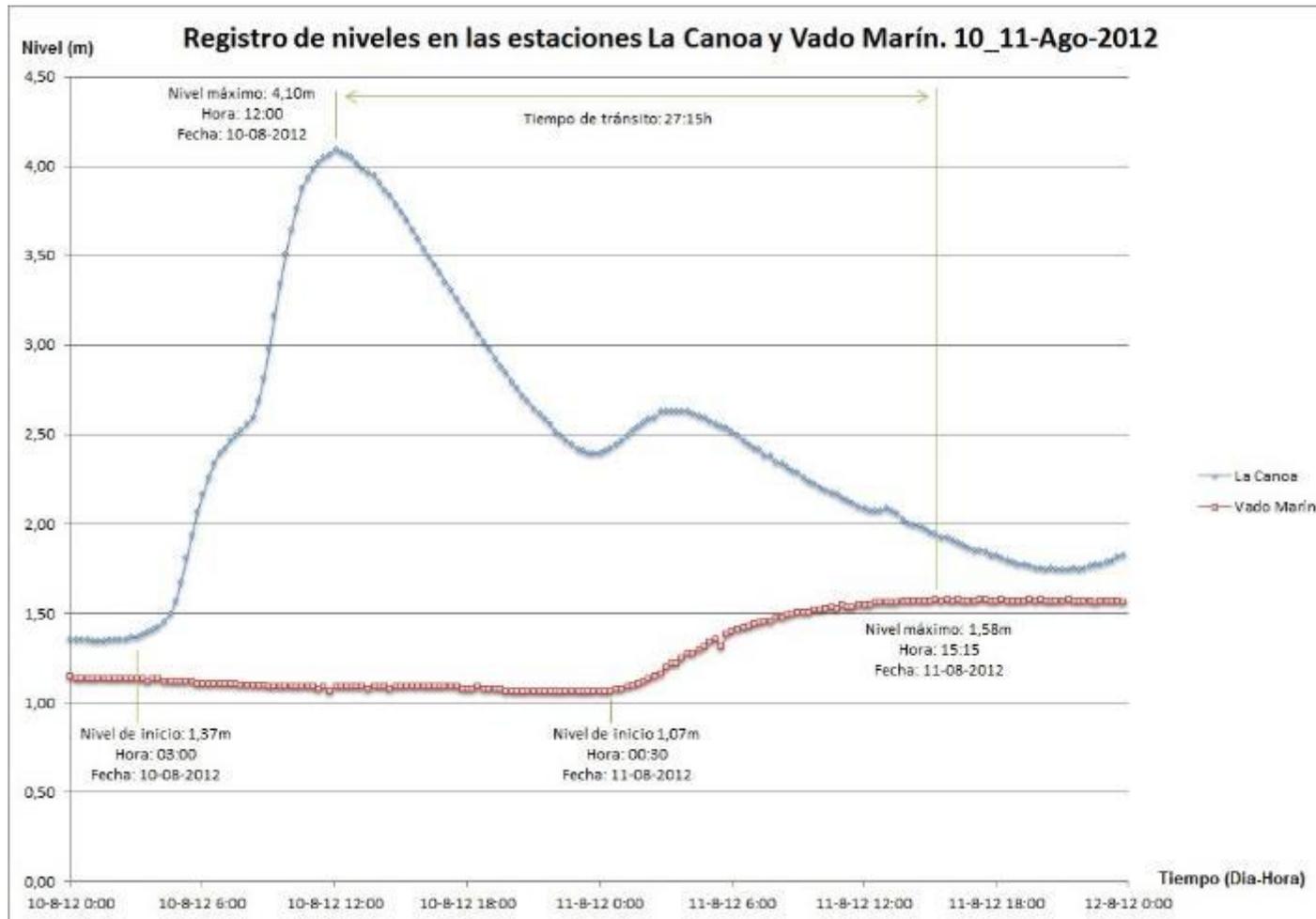
La relación de tiempo de tránsito obtenida es la siguiente:



Gráfica 3-24 Relación de tiempo de tránsito El Delirio – Vado Marín 2006.

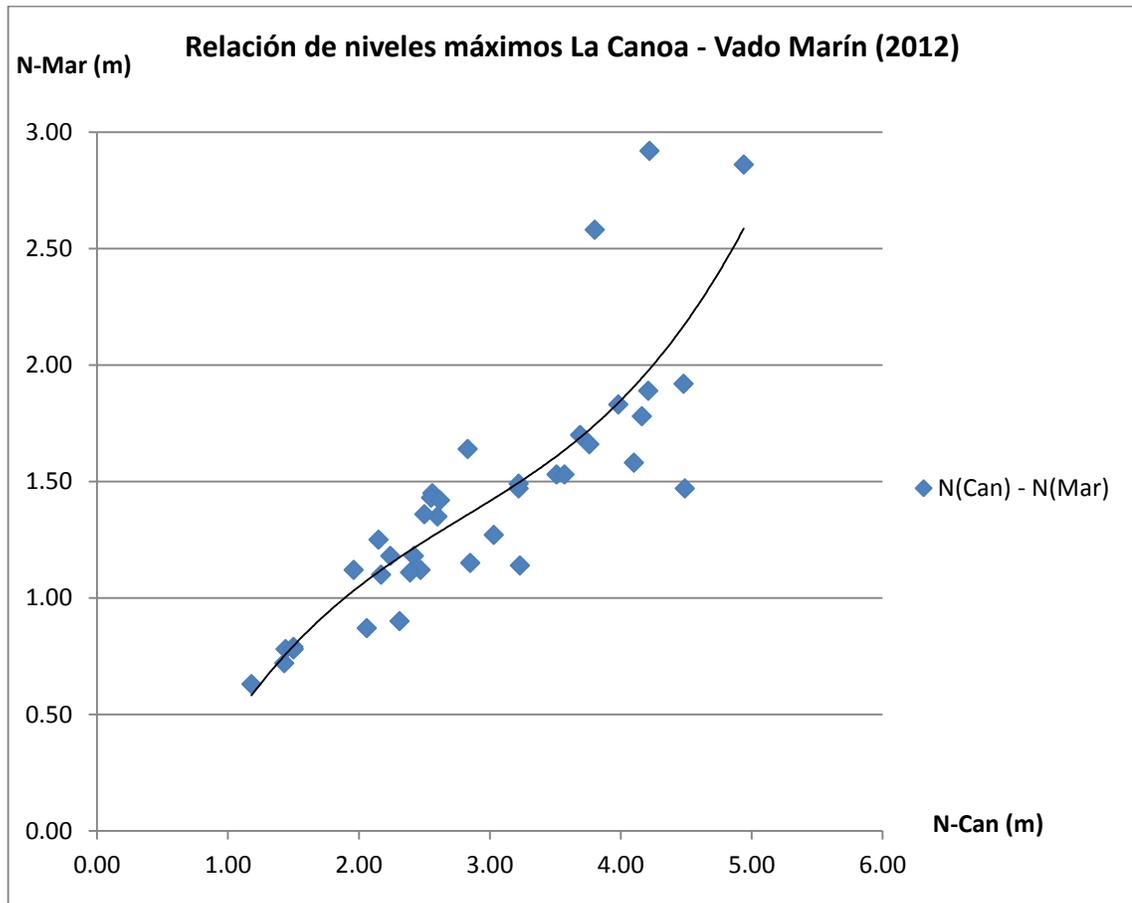
Los resultados obtenidos son completamente diferentes a los de Villerías – El Delirio y Villerías – La Canoa, pues a mayor nivel de la crecida, mayor es el tiempo de tránsito. Observamos que del gráfico anterior se pueden separar los puntos de dispersión en tres grupos principales:

- 1- Un grupo inferior compuesto por crecidas menores a 3.5 m y con tiempos de tránsito menores a 16:00 horas.
- 2- Un grupo superior compuesto por crecidas mayores a 3.5 m y con tiempos de tránsito mayores a 20:00 horas.
- 3- Y finalmente un tercer grupo intermedio que une a los dos anteriores, en el que se encuentran crecidas entre 3 y 4 m, con tiempos que oscilan entre 15 y 20 horas.



Gráfica 3-25 Registro de niveles máximos y tiempo de tránsito La Canoa – Vado Marín 2012.

Se realizó este procedimiento para todos los días que tuvieran registros en la época lluviosa, la tabla de resultados se puede encontrar en el Anexo 5.

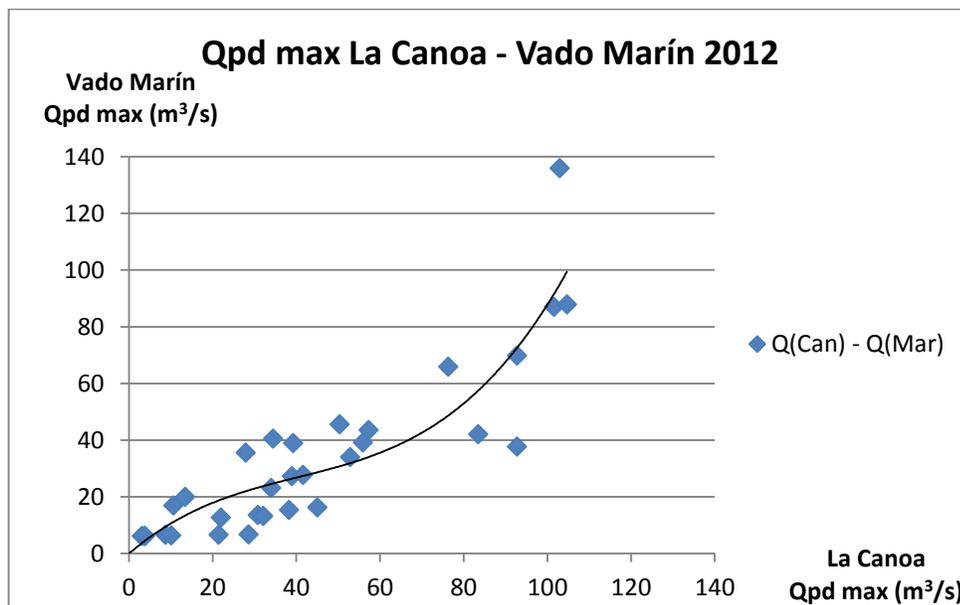
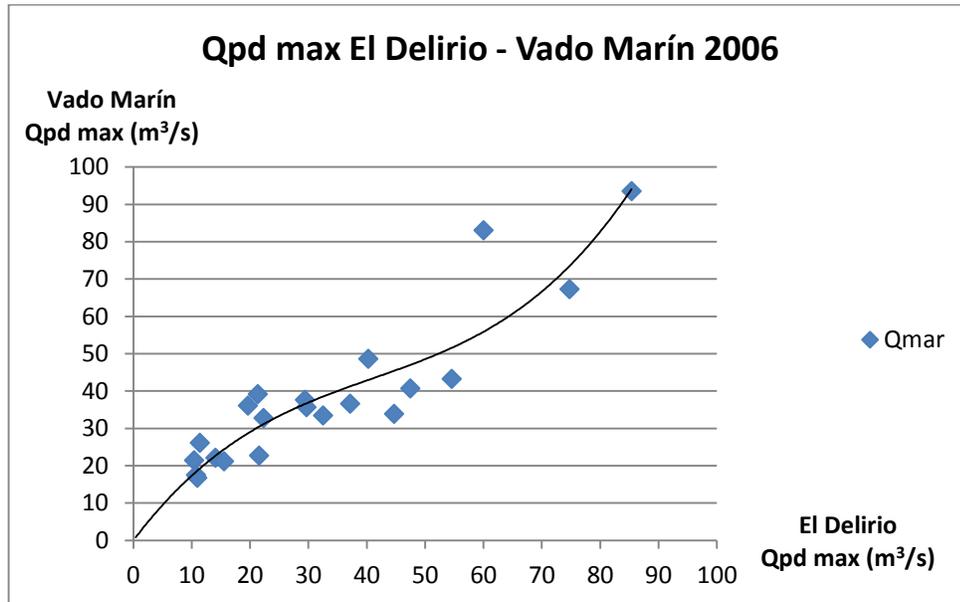


Gráfica 3-26 Relación de niveles máximos La Canoa – Vado Marín.

Esta tendencia tiene bastante similitud con las tendencias mostradas por las relaciones de Qpd máximos del período 77-81, en dicho análisis se explicó que esta tendencia podría deberse a planicies de inundación, que disminuyeran el amortiguamiento que la laguna produce en las avenidas del RGSM.

Este comportamiento se comprobó con la ayuda de los guarda recursos, con quienes se mantuvo un monitoreo constante de los niveles de la laguna; ésta al alcanzar un nivel de 27.66 m.s.n.m. se unió en una sola planicie con el RGSM, fecha a partir de la cual la relación de niveles máximos comenzó a formar una tendencia cúbica.

Ahora, si convertimos las relaciones de niveles máximos de los años 2006 y 2012 a caudales promedio diarios, se obtienen las siguientes relaciones:

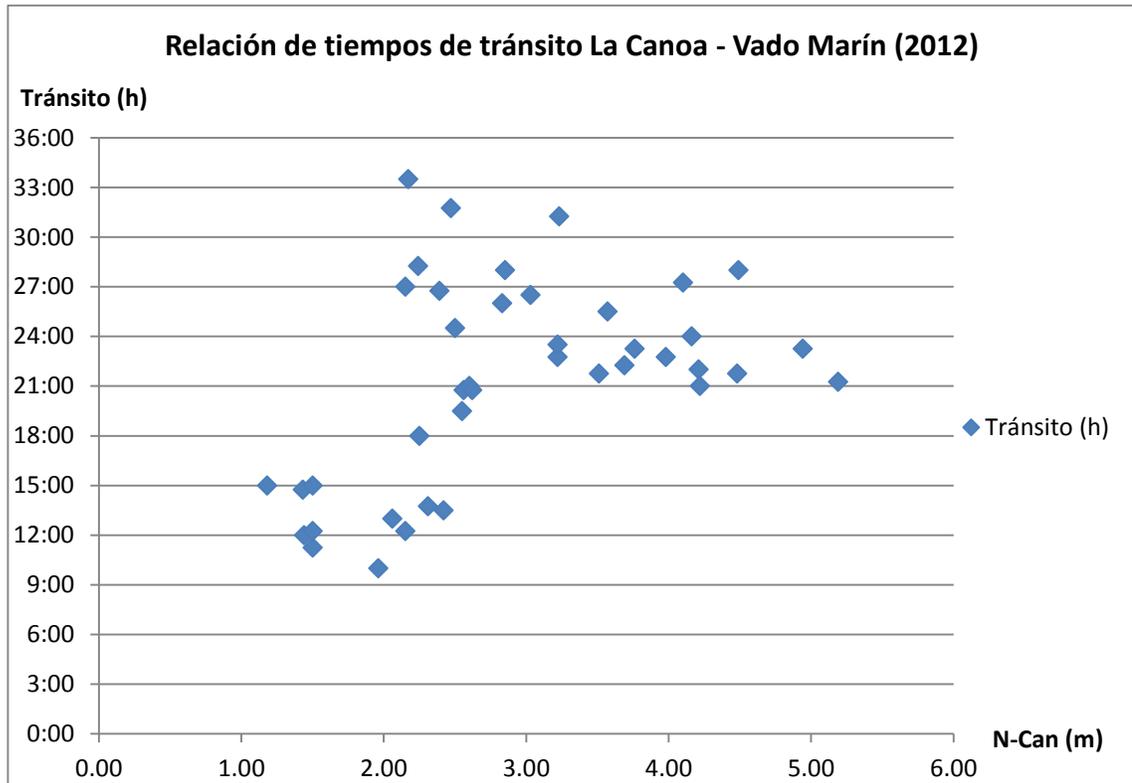


Con estos resultados comprobamos que los comportamientos asumidos en el análisis de caudales promedio diarios: “Normal, Laguna, Retención y Planicie” son correctos, y que la influencia que la Laguna EL Jocotal tiene en las avenidas del RGSM continúa siendo la misma que las establecidas para la década del 70.

Es importante notar también que esta planicie se produjo incluso en años secos como 1977, 2006 y 2012, por lo que podemos establecer que año con año la laguna El Jocotal se une en una sola planicie con el Río Grande de San Miguel.

Por otro lado, la relación de tiempo de tránsito obtenida para el año 2012 es similar a la del año 2006, ya que mientras mayor es la crecida, más tiempo le toma a ésta llegar aguas abajo; además, los puntos de dispersión también pueden clasificarse en tres grupos principales:

- Uno inferior cuyos tiempos son menores a 15 horas,
- otro superior con tiempos mayores a 20 horas, y
- uno intermedio que une a los grupos anteriores.



Gráfica 3-27 Relaciones Nivel – Tiempo de transito La Canoa – Vado Marín.

Para determinar las condiciones en base a las cuales una crecida registrada en La Canoa se cataloga en cualquiera de los 3 grupos, se analizaron también las siguientes características:

- El nivel del RGSM en la estación Vado Marín al momento en que se registra el nivel máximo en La Canoa, “N(base)”.
- La tendencia del nivel del RGSM en Vado Marín al momento en que se registra el nivel máximo en La Canoa, “(→)”.
- El nivel del RGSM en Vado Marín al momento en que inicia al paso de la crecida por dicha estación, “N(inicio)”.

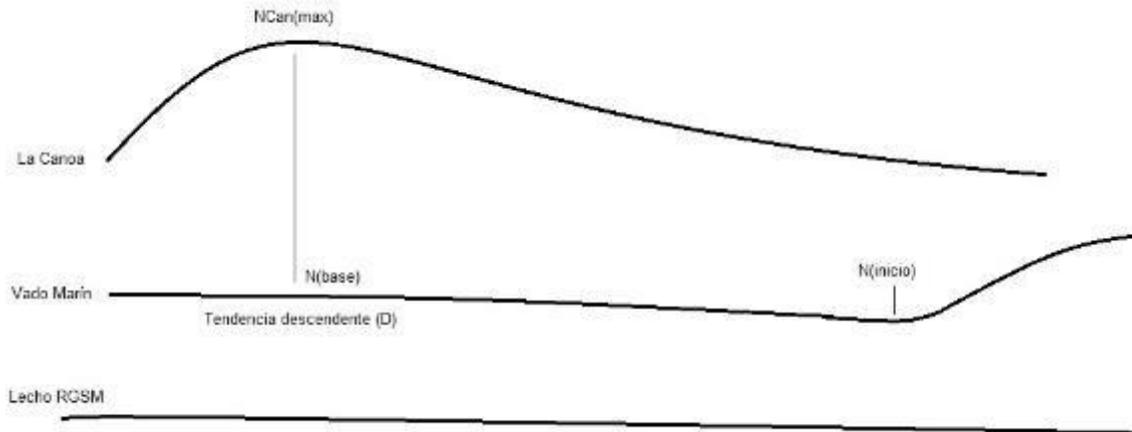
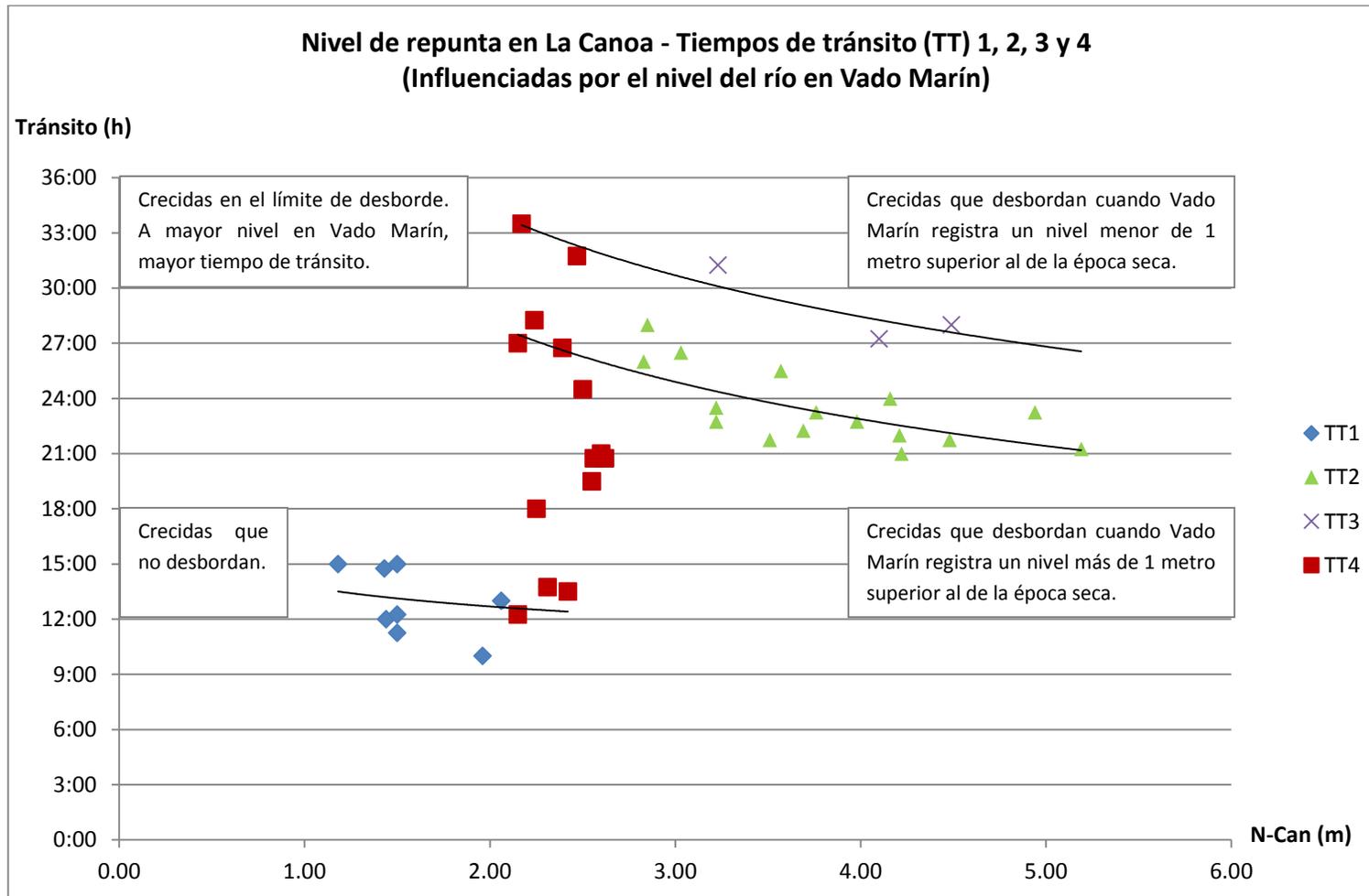


Imagen 3-28 Esquema de Nivel base, Nivel de inicio y Tendencia del río.

Del monitoreo en tiempo real de las características anteriores se determinó lo siguiente:

- El grupo en el que se clasifica cada crecida depende del nivel registrado en La Canoa y el nivel de inicio “N(inicio)” registrado en Vado Marín.
- No hay diferencias significativas entre “N(base)” y “N(inicio)”, por lo que las crecidas se pueden clasificar también por el nivel registrado en La Canoa y el nivel base “N(base)” registrado en Vado Marín.
- La tendencia del nivel del río en Vado Marín es irrelevante para la clasificación de las crecidas registradas en La Canoa.
- Son 4 los grupos en los que se puede dividir la nube de dispersión:
 - 1- Crecidas que no desbordan.
 - 2- Crecidas que desbordan cuando en Vado Marín se registra un nivel alto.
 - 3- Crecidas que desbordan cuando en Vado Marín se registra un nivel bajo.
 - 4- Crecidas indeterminadas. Estas se encuentran en una zona de transición en la que pueden o no desbordar, cuando La Canoa registra crecidas entre 2.15 y 2.60 metros.

A continuación mostramos la subdivisión de grupos de tiempos de tránsito, con la que damos por concluido el análisis de niveles registrados a cada 15 minutos, y con la que determinamos que efectivamente las condiciones de desborde históricas son similares en la actualidad.



Gráfica 3-28 Tiempo de tránsito - Nivel de crecida en La Canoa influenciada por el nivel del río en Vado Marín.

3.4.3. Análisis del Índice de Sinuosidad

Los trazados de los cauces fluviales se clasifican como sigue:

Tabla 3-12 Características de los trazados de los ríos según su Índice de Sinuosidad.

Tipo de cauce	Morfología	Índice de Sinuosidad	Tipo de carga	Anchura/ profundidad	Tipo de acción erosiva	Tipo de sedimentación
Rectilíneo	Un solo cauce, con pozas y rápidos.	<1.05	En suspensión mixta o carga de fondo	<40	Ensanchamiento e incisión del cauce menor.	Barras oblicuas y longitudinales
Ligeramente sinuoso	Un solo cauce, pozas y rápidos	>1.05 <1.50	Mixta	<40	Ensanchamiento creciente del cauce e incisión.	Barras oblicuas
Meandriforme	Un solo cauce (a veces con barra puntual interior)	>1.50	En suspensión o carga mixta	<40	Incisión del cauce, ensanchamiento del meandro.	Formación de barra puntual
Trenzado "braided"	Dos o más cauces con barras y perímetro inestable	>1.30	Carga de fondo	>40	Ensanchamiento del cauce.	Acumulación en el cauce y formación de barras centrales y diagonales
Anastomosado	Dos o más cauces con grandes islas estables	>2.0	Carga en suspensión	<10	Lento ensanchamiento del meandro.	Lenta acreción del margen

El principal criterio que diferencia estos tipos de cauces es el índice de sinuosidad (IS), definido por la expresión:

$$IS = \frac{\textit{longitud del cauce}}{\textit{longitud del eje central de meandros}}$$

Donde:

Longitud del cauce = longitud del eje central del cauce.

Longitud del eje central de meandros = longitud de una línea recta que atraviesa el centro de los meandros.

(Carmelo, 1992)

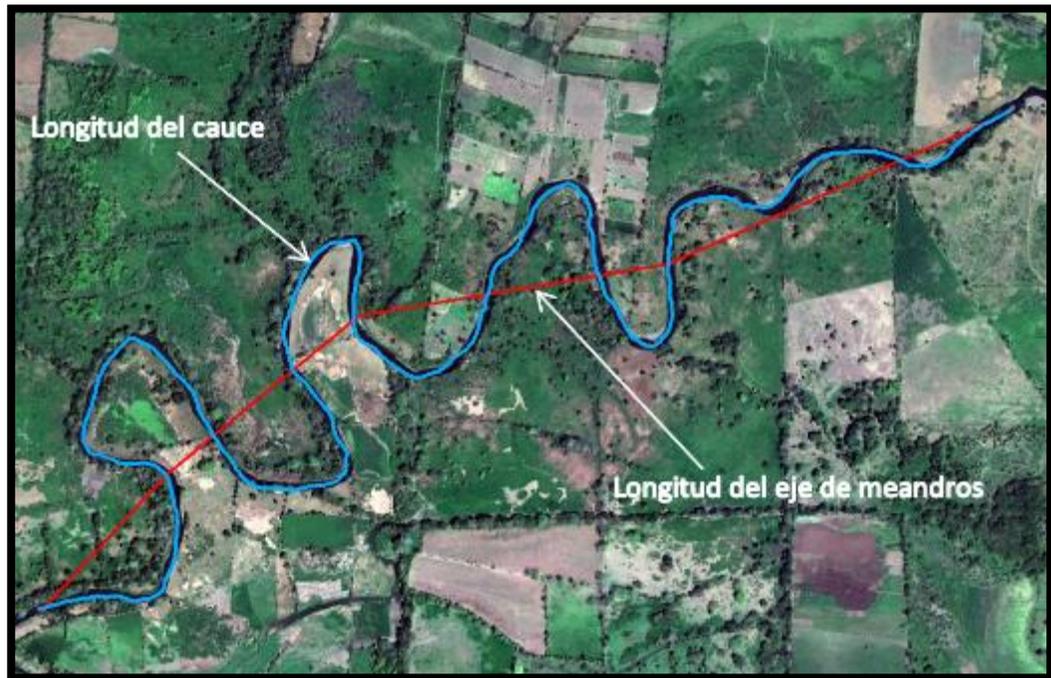


Imagen 3-29 Componentes del cálculo del Índice de Sinuosidad.

Cálculo del Índice de Sinuosidad para el Rio Grande de San Miguel.

Para este cálculo se determinó el eje central de meandros para todo el Rio Grande de San Miguel (línea color verde en la imagen 3-30). Este divide el trazado del río en 62 tramos, a los que se les calculó el Índice de Sinuosidad, y junto a esto, se trazó el perfil del río para comparar las pendientes con la sinuosidad de cada tramo.

Los resultados de estos cálculos se encuentran en el Anexo 6 y Anexo 7 y las observaciones de esta sección se encuentran en el apartado de “Conclusiones del capítulo”.

Cálculo del Índice de Sinuosidad en el
Río Grande de San Miguel

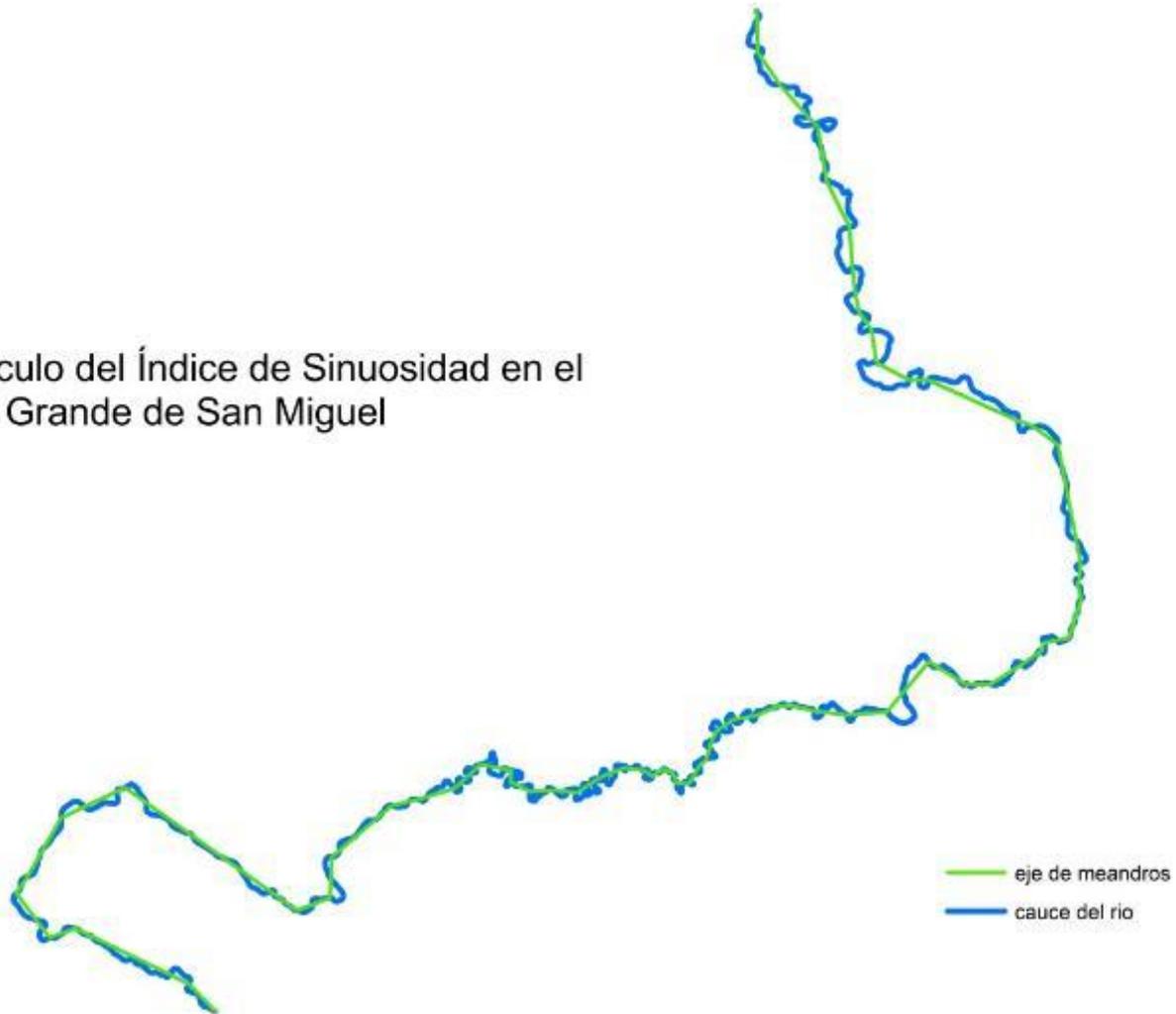
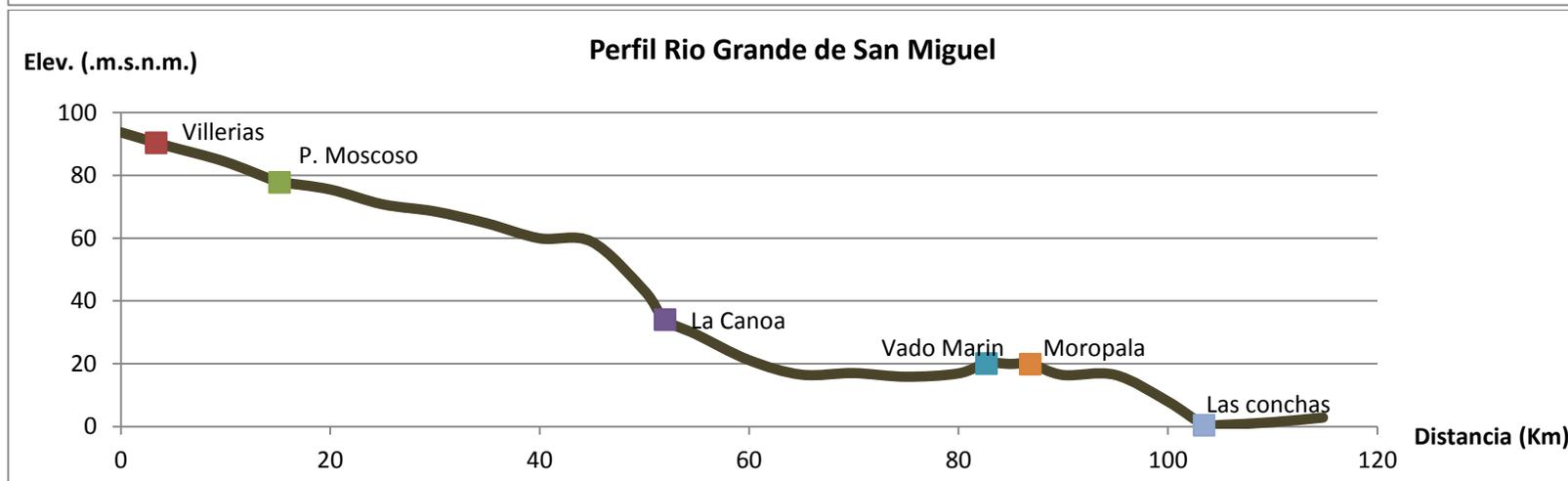
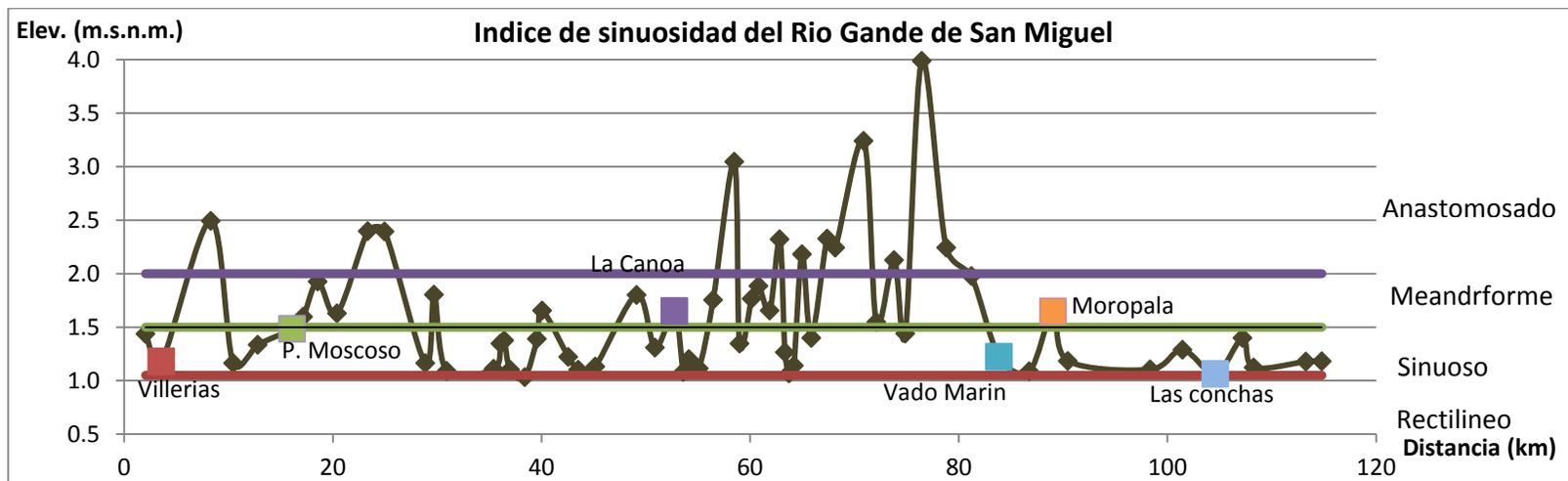


Imagen 3-30 Trazado del cauce del RGSM y su eje de meandros.



Gráfica 3-29 Comparación entre Índice de Sinuosidad y perfil del RGSM.

3.5. Conclusiones del capítulo.

- 1- Con visitas de campo, entrevistas y el análisis de cuadrantes e imágenes satelitales, se determinó que la interacción entre la Laguna El Jocotal y el Río Grande de San Miguel cambió durante los últimos años de la década del 2000, debido a la formación de un nuevo cauce conocido como La Rotura, éste habría conectado ambos recursos hídricos de forma directa durante el período aproximado 2006-2010.
- 2- Del estudio de la hidrografía y batimetría de la Laguna El Jocotal se confirma lo siguiente:
 - Se presentó un azolve acelerado en la laguna durante el período 2006-2011, que coincide con el período de mayor influencia del cauce La Rotura; además, se estima que durante este lapso de tiempo, la profundidad se habría reducido unos 0.7 m, y el volumen de agua unos 2.9 Mm³.
 - La zona más afectada por el azolve es la franja sureste donde desemboca el cauce La Rotura, mientras que la menos afectada es la circundante a la Poza Azul; éstas presentan una profundidad efectiva promedio de 0.2 y 3.0 metros respectivamente.
 - A partir del azolve acelerado de la laguna se ha detectado un aumento en el ancho de los desagües actuales, tanto de los intermitentes como de los permanentes, principalmente en el secundario, donde el ancho ha incrementado desde unos 4 metros a principios del 2000 hasta 28 metros en el 2012.
- 3- De la comparación del análisis de caudales promedios diarios con la relación de niveles máximos La Canoa – Vado Marín y el monitoreo en tiempo real que se hizo de ésta, se concluyó que año con año, la Laguna El Jocotal, El Río Grande de San Miguel y las lagunas ubicadas al sur de éste, se unen en una sola planicie de inundación.
- 4- Al comparar las relaciones de caudales promedios diarios máximos entre La Canoa y Vado Marín para todo el registro utilizable, se establece que las condiciones de desborde y planicie del Río Grande de San Miguel hacia la Laguna El Jocotal, se mantienen desde la década de los 70's hasta la actualidad.

- 5- La relación de niveles máximos entre La Canoa y Vado Marín, indica que las avenidas del Río Grande de San Miguel son amortiguadas por la Laguna El Jocotal de la siguiente manera:
 - Si la laguna no ha formado una planicie con el río, ésta amortigua hasta un 60% el tirante de la crecida.
 - Si la laguna ha formado una planicie con el río, ésta amortigua hasta un 40% el tirante de la crecida.

- 6- La relación de tiempo de tránsito entre La Canoa y Vado Marín, indica que las avenidas del Río Grande de San Miguel son retrasadas por la Laguna El Jocotal de la siguiente manera, al atravesar este tramo del río:
 - Si la crecida no desborda, tarda entre 15 y 9 horas.
 - Si la crecida desborda luego de un período seco, tarda entre 35 y 27 horas.
 - Si la crecida desborda durante un período lluvioso, tarda entre 27 y 21 horas.

- 7- Observamos que la Laguna El Jocotal, ubicada entre las estaciones La Canoa y Vado Marín, se encuentra en una zona de alto Índice de Sinuosidad clasificada como anastomasada, es decir, una zona de meandros pronunciados con numerosos brazos que se reintegran al cauce principal del río, formando grandes islas estables; por lo que es natural que estos brazos bajo circunstancias especiales, pueden llegar a conectarse con la Laguna El Jocotal, como en el caso del cauce La Rotura.

- 8- Además según el perfil del río, el tramo La Canoa – Vado Marín corresponde a una zona de baja pendiente, indicando que efectivamente en ésta las crecidas tienen la mayor pérdida de energía, explicando el comportamiento de extracción, ya no como una pérdida de caudal, sino como una atenuación del hidrograma.

CAPÍTULO 4

MODELO HIDROLÓGICO

4.1. Introducción.

Al principio de la investigación se planteó la elaboración del Modelo Hidrológico de la Laguna El Jocotal para evaluar los caudales de entrada y de salida que circulan por esta, y con ello determinar cual tiene la mayor influencia en la problemática de inundaciones; sin embargo, durante la investigación se encontró que no son las lluvias de la subcuenca de la laguna las que causan incrementos de nivel significativos, sino las que se dan en la parte alta de la cuenca del Río Grande de San Miguel. Esto llevó a un replanteo del análisis de la problemática que concluyó en la elaboración del Modelo Hidrológico del Río Grande de San Miguel, aumentando la complejidad del análisis al incorporar la Laguna de Olomega al estudio.

Es importante mencionar que el modelo que aquí se presenta no pretende representar las características hidrológicas reales del Río Grande de San Miguel, sino únicamente simular sus caudales, para estimar cuánto de este ingresa a la laguna y cuánto se mantiene en su cauce.

En la sección final del capítulo se elaboran seis escenarios hipotéticos que varían según la forma en que el RGSM aporta caudal a la laguna y la forma en que ésta lo descarga. De este modo se determinaron las variables más influyentes en la problemática de inundaciones.

4.2. Registros meteorológicos e hidrométricos.

Según el tipo de información se tienen distintos períodos de registros, entre los que se pueden establecer de forma generalizada los siguientes:

Tabla 4-1 Registros disponibles para la elaboración del Modelo Hidrológico.

Tipo de registro	Períodos de registros principales
Precipitación	1970-2012
Evaporación	1970-2012
Caudal	1970-1981, 2003-2007 y 2012
Nivel de lagunas	1970-1981 (Olomega) y 2012 (El Jocotal)

El modelo HBV compara los caudales calculados con los registrados para determinar la calidad de la calibración, por lo tanto, los períodos establecidos para elaborar el modelo fueron: 1970-1981, 2003-2007 y 2012; estos períodos dejan fuera los 4 eventos extremos que han afectado a

la laguna históricamente: el que produjo la primera gran inundación en 1988, Huracán Mitch en 1998, Tormenta Tropical Agatha en 2010 y Depresión Tropical 12E, en 2011.

Por lo anterior y ya que las condiciones de desborde históricas son similares a las actuales (véase 3.5 Conclusiones del capítulo 3), se decidió realizar un modelo que simulara el período 1970-2012, equivalente a 43 años, a manera de incluir todos los eventos máximos históricos que han afectado a la Laguna El Jocotal. Para esto, se extrapolaron las condiciones de calibración del período 1970-1981 hasta el año 1991; y las condiciones del período 2003-2012 se extrapolaron hacia atrás hasta el año 1992.

A continuación se presentan las estaciones utilizadas para la elaboración del modelo:

Tabla 4-2 Estaciones utilizadas en el Modelo Hidrológico del RGSM.

Código	Nombre	Código	Nombre
P101	Usulután	Q201	Villerías
P102	Jucuarán	Q202	Puente Moscoso
P103	Puerto Parada	Q203	La Canoa / El Delirio
P104	Jucuapa	Q204	Vado Marín
P106	San Miguel Fenadesal	Q205	Las Conchas
P107	Lolotique	W301	Laguna de Olomega
P108	Ciudad Barrios	W302	Laguna El Jocotal
P109	El Papalón	E401	Santiago de María
P112	Beneficio El Sitio	E402	San Fco. Gotera
P114	Hacienda El Cañal	E403	Beneficio La Carrera
P115	Sesori	E404	Sesori
P118	Olomega	E405	El Papalón
P122	Intipucá		
P126	San Fco. Gotera		

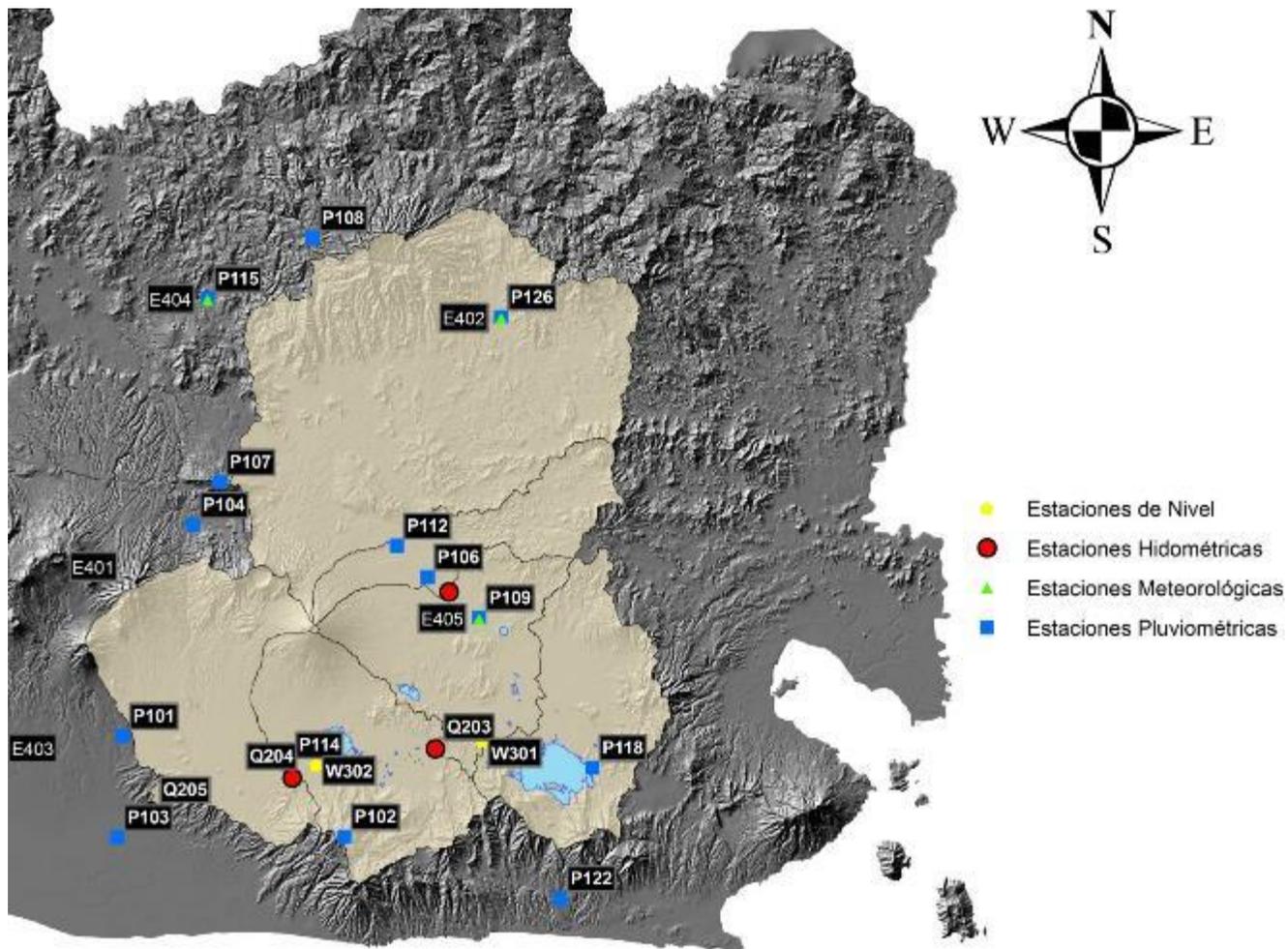


Imagen 4-1 Ubicación de las estaciones utilizadas en el Modelo Hidrológico del RGSM.

4.3. Elaboración del Modelo Hidrológico del Río Grande de San Miguel

A continuación se presentan las subcuencas utilizadas, sus conexiones; se describen los procedimientos seguidos para lograr que el modelo simule la influencia que tiene la Laguna El Jocotal en las avenidas del Río Grande de San Miguel y los resultados de la calibración.

4.3.1. Parámetros geográficos de la cuenca del RGSM.

La cuenca del RGSM se subdividió en base a dos criterios principales:

- Las estaciones hidrométricas de las que se tiene registro.
- Las lagunas principales con desagüe: Laguna de Olomega y Laguna El Joccotal.

El modelo HBV distingue los siguientes tipos de áreas para cada subcuenca:

- Forest: para terrenos con nieve.
- Field: para terrenos sin nieve.
- Glac: para zonas glaciares.
- llake: para lagos sin desagüe.
- Olake: para lagos con desagüe.
- Total: es la suma de todos los tipos de áreas que contiene la subcuenca.

De los tipos de áreas anteriores se tienen 3 en la cuenca del RGSM, estas son:

Tabla 4-3 Áreas de las subcuencas del Modelo Hidrológico del RGSM.

Subcuenca	Área Total (Km ²)	Field		Olake		llake	
		Área (Km ²)	Elevación (msnm)	Área (Km ²)	Elevación (msnm)	Área (Km ²)	Elevación (msnm)
Villerías	899.83	899.83	361.41	0.00	-	0.0	-
Puente Moscoso	166.42	166.42	248.78	0.00	-	0.0	-
Olomega	280.31	254.44	171.13	25.36	62.37	0.51	64.67
La Canoa	268.67	266.58	159.93	0.00	-	2.09	66.00
<i>Nacimientos*</i>	<i>23.00</i>	<i>17.21</i>	<i>300.00</i>	<i>5.79</i>	<i>180.00</i>	<i>0.00</i>	-
El Jocotal	289.39	282.96	228.18	5.61	26.00	0.82	26.83
Las Conchas	359.00	359.00	344.66	0.00	-	0.00	-

- Subcuenca ficticia para simular el caudal que los manantiales ingresan a la laguna.

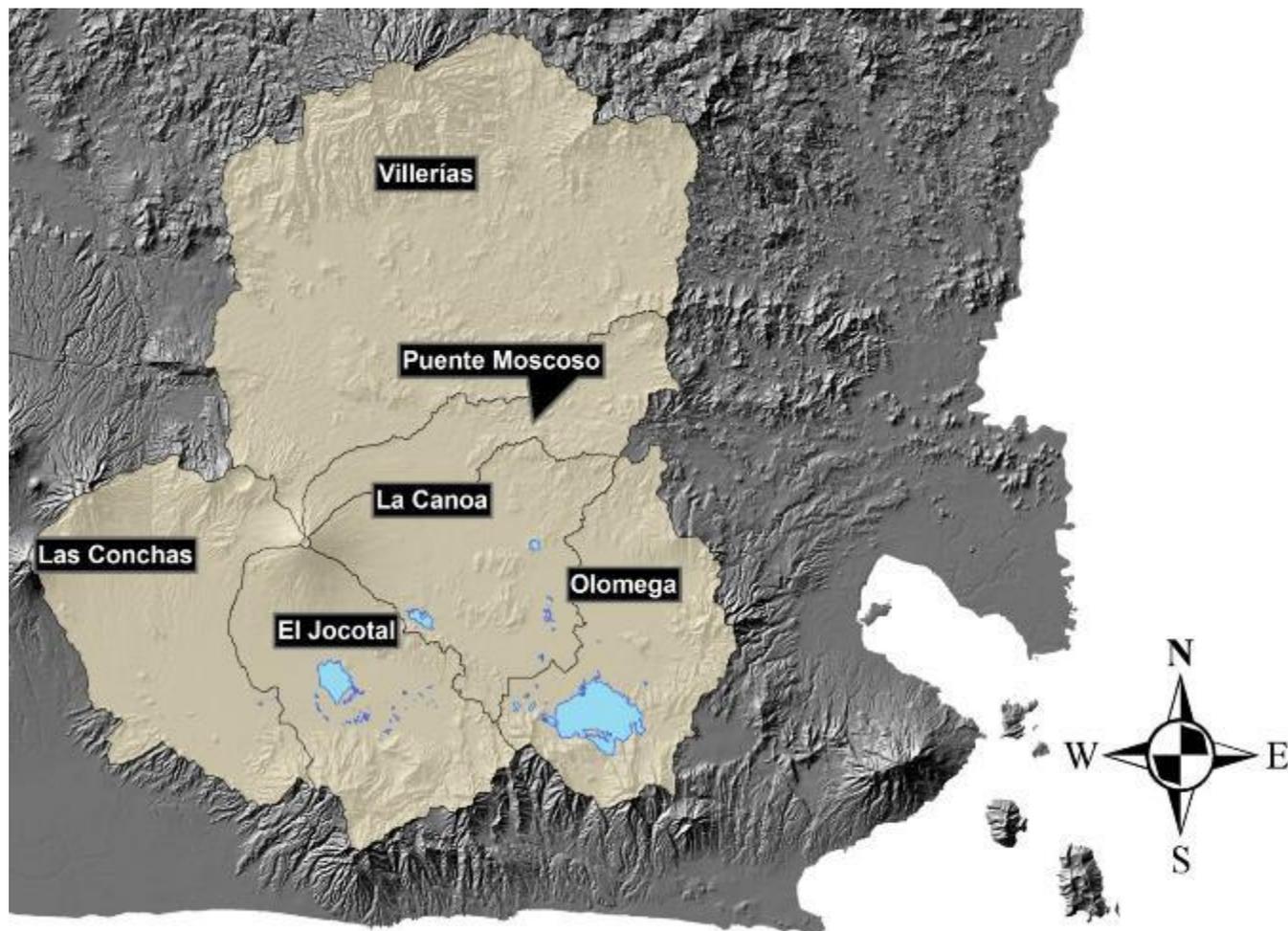


Imagen 4-2 Subcuencas del Modelo Hidrológico del RGSM.

4.3.2. Conexiones entre subcuencas.

Para simular el caudal en el punto de salida de cada subcuenca el modelo considera dos flujos de entrada principales:

- Escorrentía generada en la misma subcuenca.
- Caudal proveniente desde otra subcuenca.

El caudal proveniente desde otra subcuenca puede ser de los siguientes tipos:

- In: Ingresa todo el caudal de salida de una subcuenca aguas arriba.
- Main: Ingresa una porción del caudal de salida de una subcuenca aguas arriba.
- Branch: Ingresa la parte restante del caudal de salida no utilizada en Main.

Main y Branch son las conexiones utilizadas para simular el comportamiento de las lagunas y su funcionamiento se explicará en el siguiente apartado. A continuación se presenta un esquema de las conexiones entre las subcuencas del modelo elaborado.

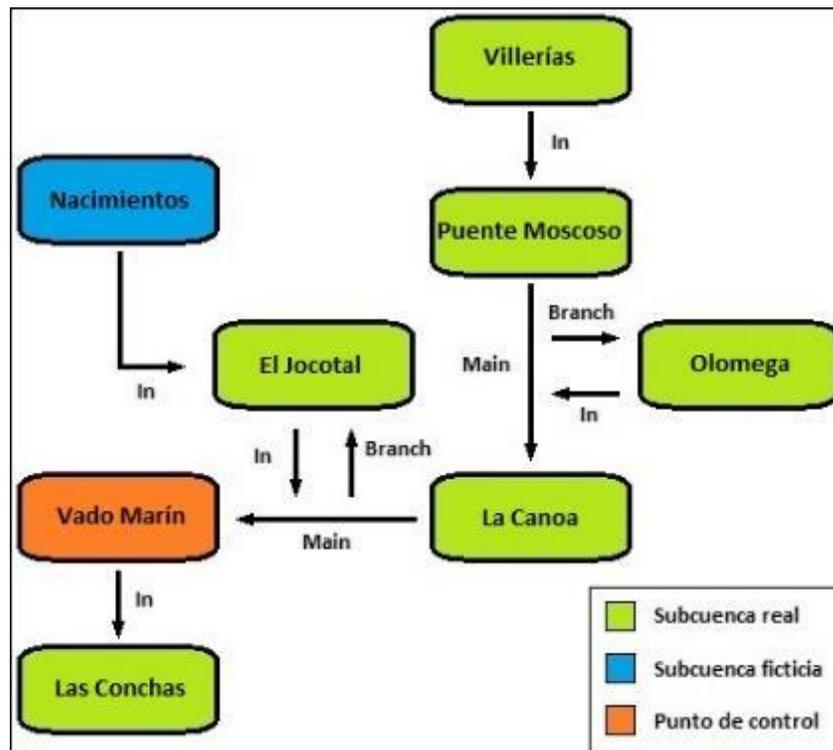
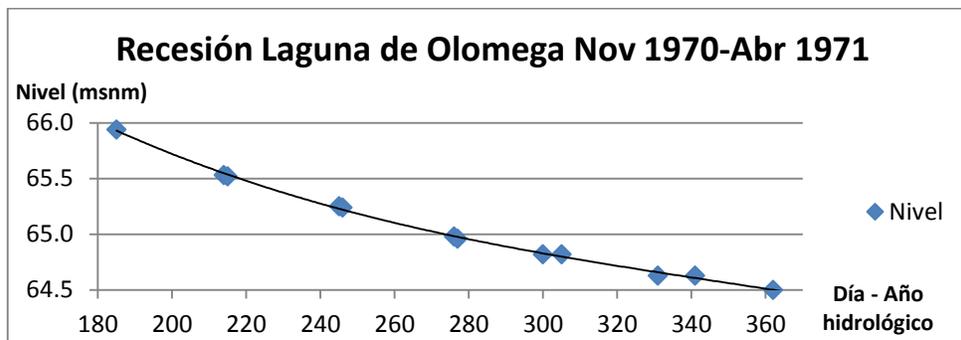
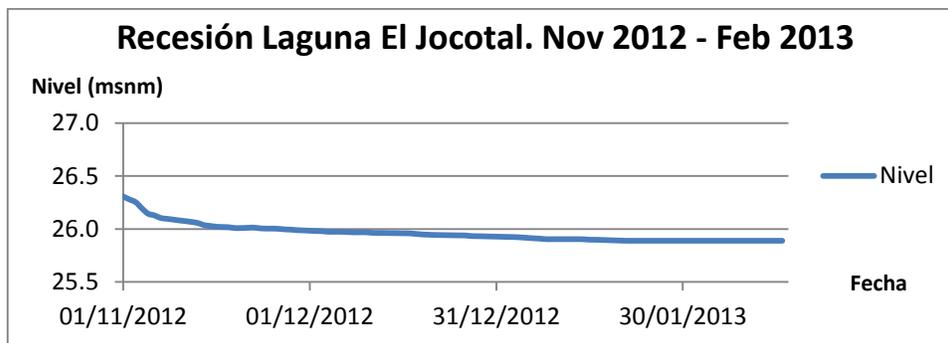


Imagen 4-3 Esquema de las conexiones entre las subcuencas del Modelo Hidrológico del RGSM.

En el esquema anterior se presentan 3 tipos de nodos:

- 1- Subcuenca real: representa una porción del área de la cuenca del RGSM.
- 2- Subcuenca ficticia: no representa un área real de la cuenca del RGSM. En este caso, es un lago con descarga constante que simula el caudal que los manantiales ingresan a la Laguna El Jocotal. Fue necesario un arreglo de este tipo ya que la laguna alcanza nivel constante durante la época seca, lo que implica que la descarga del Río El Desagüe se encuentra en equilibrio con el aporte de los manantiales; mientras que al analizar los registros de nivel de la Laguna de Olomega, esta situación de equilibrio no ocurre, por lo que no fue necesario simular sus manantiales, sino únicamente su descarga neta hacia el RGSM.

Gráfica 4-1 Recesiones típicas de las lagunas: Olomega y El Jocotal.



- 3- Punto de control: es una subcuenca con área igual a cero. Este tipo de nodo se utilizó en la estación Vado Marín debido a que la Laguna El Jocotal genera una planicie con el RGSM y las lagunas del sur. Esto implica que los ríos y quebradas afluentes al RGSM entre el tramo La Canoa – Vado Marín, alimentan la planicie de inundación de la laguna y no a la estación hidrométrica directamente.

4.3.3. Tablas de ramificación de caudal (Branch Table).

Son tablas que indican al modelo que divida un caudal “Q.Total” y lo dirija a través de dos cauces: principal “Q.Main” y ramificación “Q.Branch”. Esta opción es utilizada en el Modelo del RGSM para indicar el caudal que transita a través del río y el que este aporta a las lagunas Olomega y El Jocotal.

Para obtener las tablas de ramificación se consideraron los siguientes aspectos:

- No existen mediciones del caudal que el RGSM ingresa a las lagunas.
- Q.Branch considera tanto el caudal que el río proporciona a través de desbordes, como el que proporciona a través de un cauce definido como La Rotura.
- Para estimar el caudal que el río aporta se analizaron las diferencias de caudal entre las crecidas registradas por una estación aguas arriba y otra aguas abajo de cada laguna, esto implica la idealización de que todas las “pérdidas” de una crecida se encausan hacia las lagunas.
- No se considera el aplanamiento que se pueda generar en el hidrograma debido a los cambios de las características del RGSM.



Imagen 4-4 Relación entre Q.Total, Q.Main y Q.Branch.

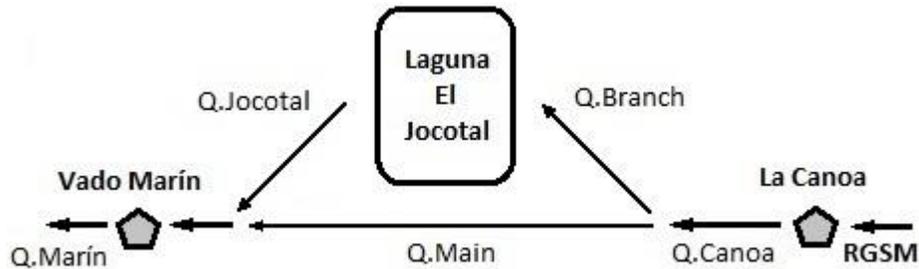


Imagen 4-5 Esquema de la relación entre Q.Marín, Q.Canoa, Q.Main y QBranch.

Del esquema anterior: (1) $Q. Canoa = Q. Main + Q. Branch$
 (2) $Q. Marín = Q. Main + Q. Jocotal$

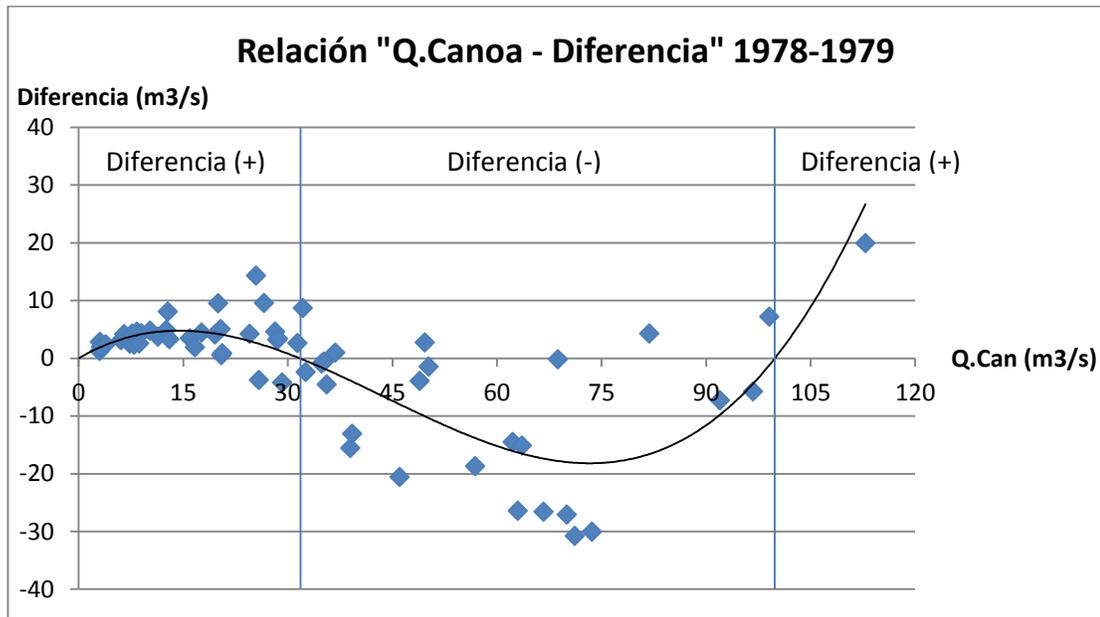
Si no existe desborde: (3) $Q. Branch = 0$,
 por lo tanto (1) pasa a ser: (4) $Q. Canoa = Q. Main$

Del análisis de las diferencias de caudal para el año hidrológico 1978-1979, tenemos:

Tabla 4-4 Qpd máximos La Canoa – Vado Marín 1978-1979.

Q.Can	Q.Mar	Dif.	Q.Can	Q.Mar	Dif.	Q.Can	Q.Mar	Dif.
2.99	4.27	1.28	17.61	22.04	4.43	36.79	37.78	0.99
3.06	5.89	2.83	19.54	23.65	4.11	38.95	23.41	-15.54
3.18	5.14	1.96	20.00	29.50	9.50	39.22	26.16	-13.06
3.88	6.29	2.41	20.34	25.42	5.08	46.01	25.43	-20.58
6.04	9.19	3.15	20.44	20.96	0.52	48.89	44.97	-3.92
6.51	10.69	4.18	20.60	21.48	0.88	49.63	52.35	2.72
7.33	9.86	2.53	24.52	28.74	4.22	50.17	48.75	-1.42
7.41	10.89	3.48	25.41	39.73	14.32	56.85	38.16	-18.69
7.66	11.97	4.31	25.83	22.08	-3.75	62.25	47.72	-14.53
7.93	10.27	2.34	26.58	36.18	9.60	62.98	36.54	-26.44
8.32	12.94	4.62	28.17	32.76	4.59	63.55	48.43	-15.12
8.64	11.21	2.57	28.49	31.70	3.21	66.66	40.07	-26.59
8.99	13.34	4.35	28.57	32.00	3.43	68.72	68.54	-0.18
10.19	14.97	4.78	29.18	24.98	-4.20	70.00	42.91	-27.09
11.34	15.08	3.74	31.38	34.03	2.65	71.16	40.37	-30.79
12.55	17.44	4.89	32.12	40.80	8.68	73.60	43.53	-30.07
12.77	20.84	8.07	32.54	30.15	-2.39	81.85	86.12	4.27
13.01	16.32	3.31	34.82	33.90	-0.92	92.00	84.71	-7.29
15.91	19.39	3.48	35.20	34.65	-0.55	96.74	91.01	-5.73
16.66	18.58	1.92	35.57	31.02	-4.55	99.04	106.22	7.18
						112.84	132.79	19.95

Al graficar la diferencia de caudal contra los caudales de La Canoa se obtiene el siguiente gráfico, que puede dividirse en 3 tramos: dos positivos y uno negativo:



Gráfica 4-2 Q.Canoa - Diferencia (Q.Marín - Q.Canoa).

Del gráfico anterior establecemos que en cualquier momento:

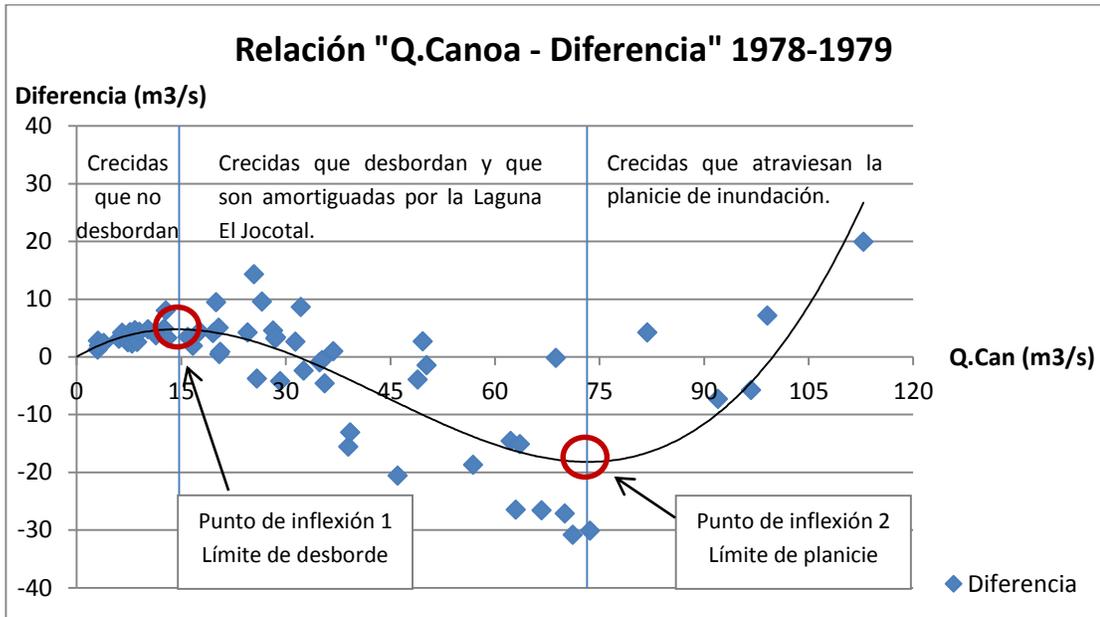
$$(5) Q. \text{Marín} = Q. \text{Canoa} + \text{Diferencia}$$

Y al sustituir (5) en (2) concluimos que, **mientras no hay desborde**:

$$(6) Q. \text{Jocotal} = \text{Diferencia}$$

Por lo tanto el límite de desborde no se da cuando la "Diferencia" es igual a cero y comienza a ser negativa, ya que esto implicaría " $Q. \text{Jocotal} = 0$ ", sino que se da en el primer punto de inflexión, cuando la tendencia de la "Diferencia" pasa de ser creciente a decreciente.

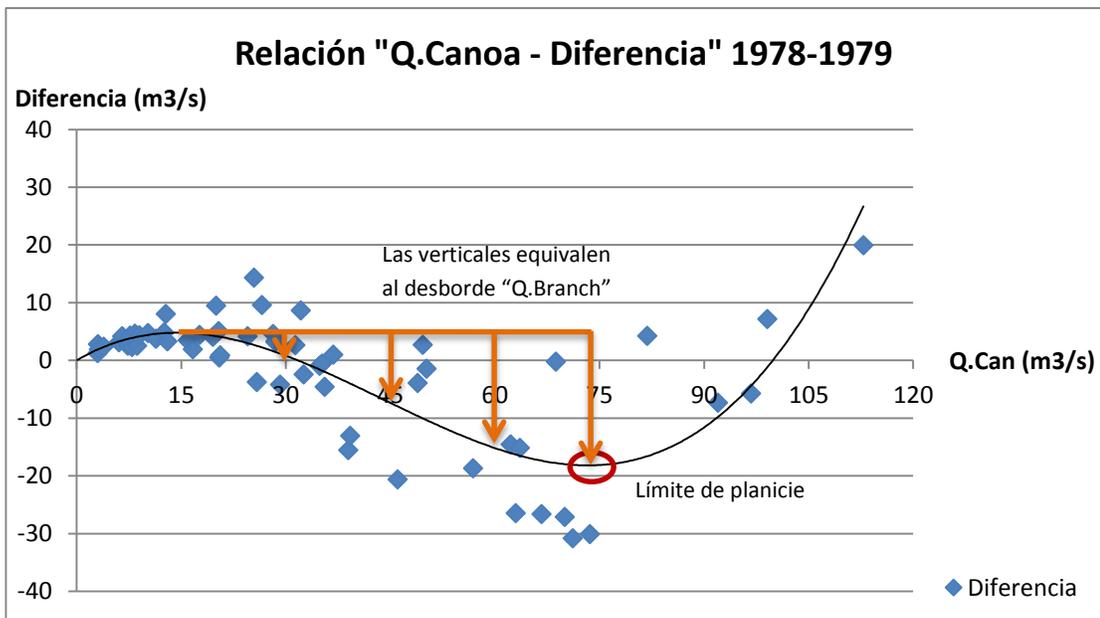
Bajo el análisis anterior, también podemos establecer que el límite de planicie no se da cuando la diferencia comienza a ser positiva nuevamente, sino que se da en el segundo punto de inflexión, cuando su tendencia pasa de ser decreciente a creciente nuevamente, como se muestra en el siguiente gráfico:



Gráfica 4-3 Límite de desborde y de planicie.

Con estos límites establecidos podemos estimar el desborde (Q.Branch), como el límite de desborde más la "Diferencia":

$$(7) Q. Branch = \text{Límite de desborde} + \text{Diferencia}$$



Gráfica 4-4 Estimación del caudal de desborde (Q.Branch).

Ahora, para comprender cómo se comporta la tabla de ramificación de caudal en el punto de planicie se muestra el siguiente esquema:

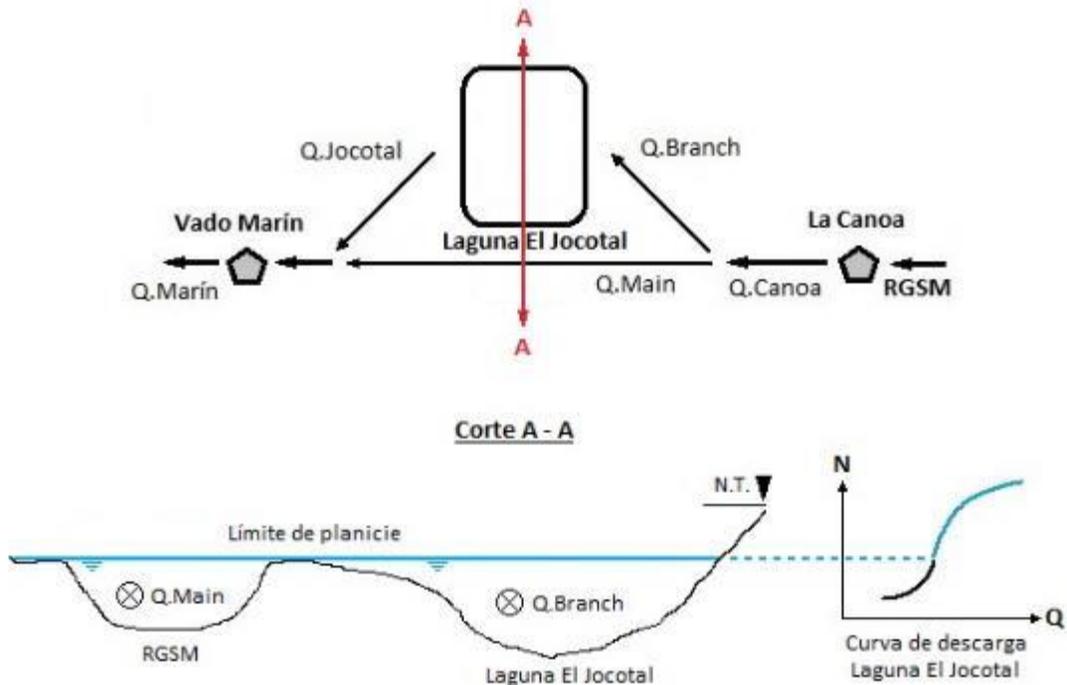


Imagen 4-6 Esquema de la planicie de inundación en la tabla de ramificación de caudal.

Observamos que a partir del límite de planicie es la curva de descarga de la laguna la que regula el caudal en Vado Marín, estableciendo un techo para el valor de " $Q.Main$ ", de modo que, para crecidas bajo el límite de desborde:

$$(4) Q.Main = Q.Canoa,$$

para las crecidas entre los límites de desborde y planicie sustituyendo (7) en (1) tenemos:

$$(8) Q.Main = Q.Canoa + \text{Límite de desborde} - Dif,$$

para crecidas sobre el límite de planicie, $Q.Main$ es constante.

La "*Diferencia*" se calcula según la ecuación que proporciona Excel:

$$(9) Dif = 0.0002247132(Q.Can)^3 - 0.029565527(Q.Can)^2 + 0.7117298005(Q.Can)$$

Finalmente, $Q.Branch$ se calcula con la siguiente ecuación:

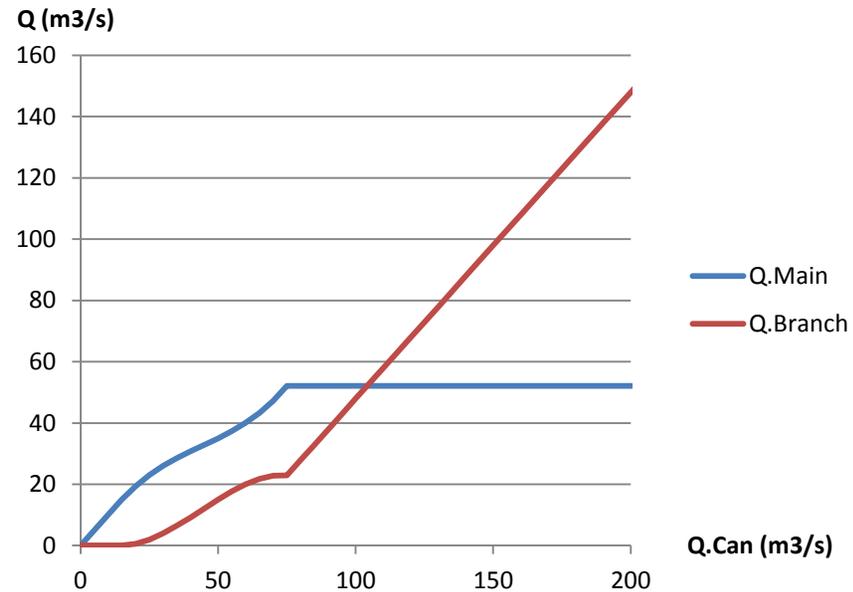
$$(10) Q.Branch = Q.Canoa - Q.Main$$

Tabla 4-5 Tabla de ramificación de caudal para estación La Canoa 1978-1979.

Q.Can (Q.Total)	Diferencia	Q.RGSM (Q.Main)	Q.Rotura (Q.Branch)
0	0.000	0.000	0.000
5	2.848	5.000	0.000
10	4.385	10.000	0.000
15	4.782	15.000	0.000
20	4.206	19.424	0.576
25	2.826	23.044	1.956
30	0.810	26.028	3.972
35	-1.673	28.545	6.455
40	-4.454	30.764	9.236
45	-7.365	32.852	12.148
50	-10.238	34.980	15.020
55	-12.904	37.314	17.686
60	-15.194	40.024	19.976
65	-16.940	43.278	21.722
70	-17.973	47.244	22.756
75	-18.126	52.092	22.908
80	-17.228	52.092	27.908
100	0.231	52.092	47.908
150	199.942	52.092	97.908
200	757.429	52.092	147.908
800	96700.589	52.092	747.908

Marcados en amarillo se encuentran los límites de desborde y planicie.

Q.Can - Q.Main y Q.Branch 1977-1978



Este procedimiento se repite para todo el registro de las estaciones aguas arriba y aguas debajo de las lagunas Olomega y El Jocotal. El resto de tablas de ramificación de caudal se presentan en el Anexo 8, Anexo 9 y Anexo 10.

4.3.4. Curvas Nivel – Almacenamiento.

La metodología para obtener esta curva de almacenamiento para la Laguna El Jocotal se constituye de dos procedimientos principales:

- Elaboración de batimetría para obtener volúmenes dentro del depósito principal de la laguna.
- Digitalización de cuadrantes para obtener volúmenes en las planicies de inundación.

La curva de almacenamiento de la laguna de Olomega se obtuvo únicamente de la digitalización de cuadrantes.

A continuación se explica la metodología completa desarrollada para la Laguna El Jocotal:

1- Batimetría.

Se calculó en el apartado 3.3.3.

2- Digitalización de cuadrantes.

Las curvas digitalizadas de los cuadrantes fueron 40, 30 y 20 msnm, las cotas de referencia y los mojones, que son las que limitan el rango de niveles en que varía el espejo de agua de la laguna.

Las curvas de nivel obtenidas con este procedimiento se muestran a continuación:

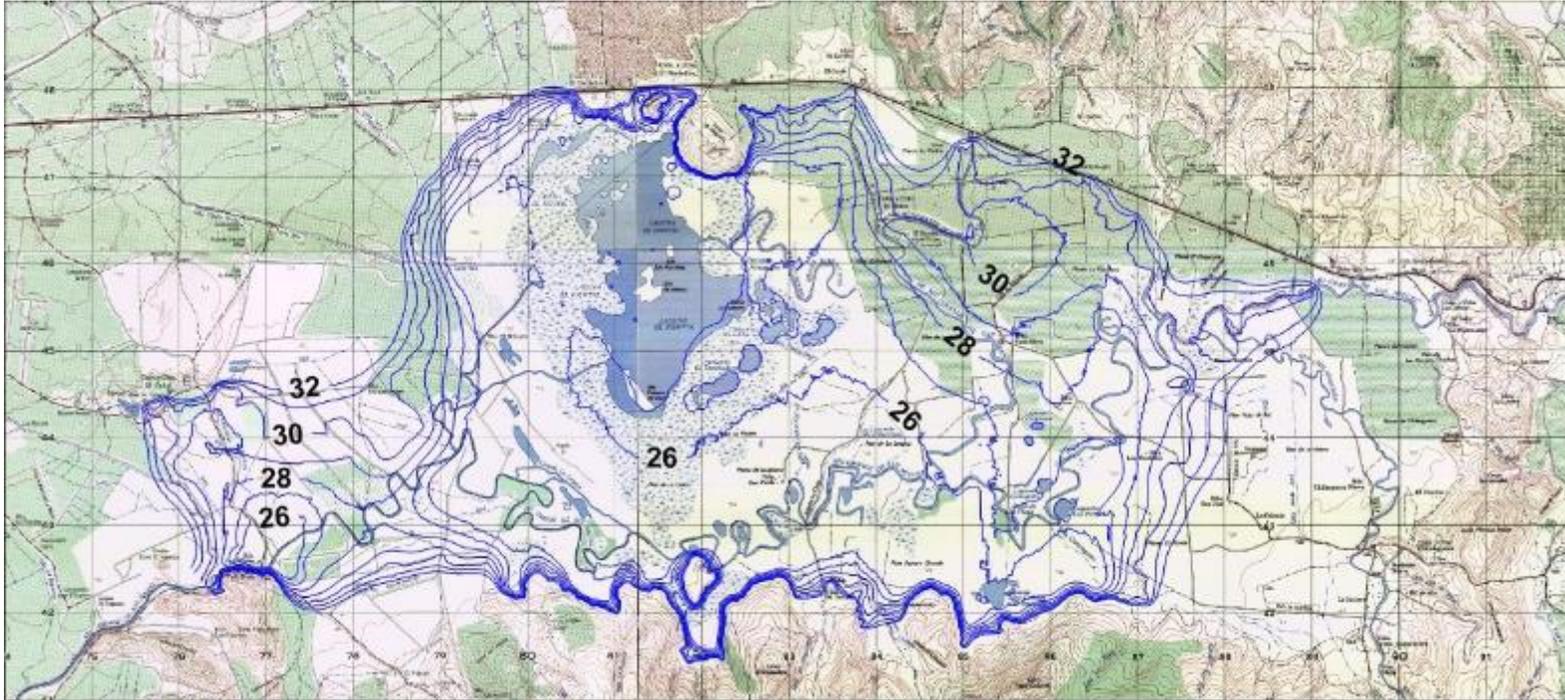


Imagen 4-7 Curvas de nivel resultantes de la digitalización de los cuadrantes.

Finalmente al unificar los volúmenes calculados mediante la batimetría con los calculados mediante la digitalización de cuadrantes se obtuvo la curva Nivel – Almacenamiento para la Laguna El Jocotal, este procedimiento se repitió también para la Laguna de Olomega.

Tabla 4-6 Curvas de almacenamiento. Laguna El Jocotal

Tramo 1: Poza Azul y manantiales				Tramo 2: Laguna El Jocotal				Tramo 3: Planicie de inundación			
N	V.Máx	V.2000	V.2012	N	V.Máx	V.2000	V.2012	N	V.Máx	V.2000	V.2012
13.0	0.1	0.1	0.1	21.75	3008.6	1417.0	1274.5	26.5	30931716	27757987	24833891
13.5	1.1	1.0	0.9	22.00	6422.0	1575.2	1406.8	27.0	44060514	40886786	37962690
14.0	4.1	3.9	3.7	22.25	17256.7	1751.6	1551.0	27.5	58627041	55453313	52529217
14.5	10.4	10.0	9.4	22.50	43944.7	1953.4	1708.0	28.0	74542300	71368572	68444476
15.0	21.1	20.4	19.0	22.75	91883.9	2190.5	1880.2	28.5	91696165	88522436	85598340
15.5	37.3	36.2	33.8	23.00	181047.5	2478.4	2071.0	29.0	110237634	107063906	104139810
16.0	60.3	58.7	54.7	23.25	317072.6	2841.6	2284.0	29.5	130214496	127040767	124116671
16.5	91.1	88.9	82.9	23.50	509364.2	3672.6	2522.9	30.0	151825039	148651310	145727214
17.0	131.1	128.0	119.4	23.75	821030.5	11021.4	2793.1	30.5	175926378	172752649	169828553
17.5	181.3	177.2	165.2	24.00	1381818.1	54568.3	3101.9	31.0	201500365	198326636	195402540
18.0	242.9	237.6	221.5	24.25	2158146.7	207546.3	3476.2	31.5	227960913	224787184	221863088
18.5	318.2	311.5	290.1	24.50	3029292.2	574391.8	3952.7	32.0	255086741	251913012	248988916
19.0	411.2	403.0	374.4	24.75	3973252.1	1202679.7	5464.9	32.5	282738909	279565181	276641085
19.5	526.5	516.6	478.3	25.00	4988367.4	2057809.8	61314.6	33.0	310862498	307688770	304764674
20.0	668.4	656.3	605.5	25.25	6069751.9	3039489.1	474455.9				
20.5	840.3	825.4	758.5	25.50	7219668.5	4117207.0	1345115.3				
21.0	1046.8	1028.0	939.5	25.75	8443403.4	5292082.5	2416526.1				
21.5	1602.0	1274.1	1153.1	26.00	9765627.6	6591899.2	3667803.1				

- Niveles en m.s.n.m. y volúmenes en m³.
- V.Máx = Volumen máximo de almacenamiento. No considera el azolve.
- V.2000 = Volumen de almacenamiento estimado para el año 2000.
- V.2012 = Volumen de almacenamiento para el año 2012.
- La curva de almacenamiento utilizada para la Laguna de Olomega se encuentra en el Anexo 11.

Curva Nivel - Almacenamiento. Laguna El Jocotal

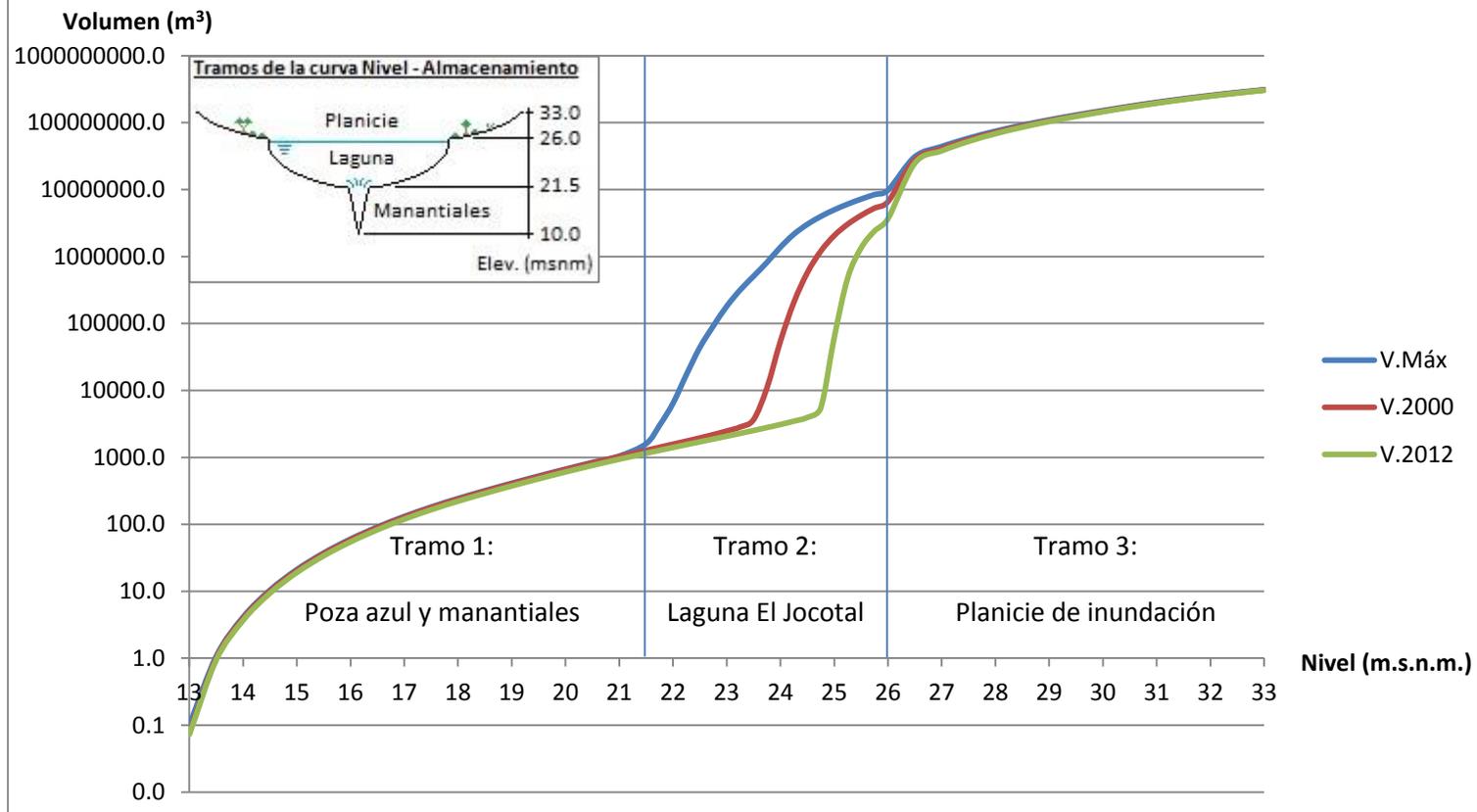


Imagen 4-8 Curvas de almacenamiento. Laguna El Jocotal

4.3.5. Curvas Nivel – Descarga.

La metodología para obtener esta curva consistió de dos procedimientos principales:

- Elaboración de aforos.
- Cálculo de la descarga en base a registros de nivel y la curva Nivel – Almacenamiento obtenida en el apartado anterior.

1- Elaboración de aforos.

Los puntos de aforo fueron: Cauce La Rotura y Río El Desagüe.

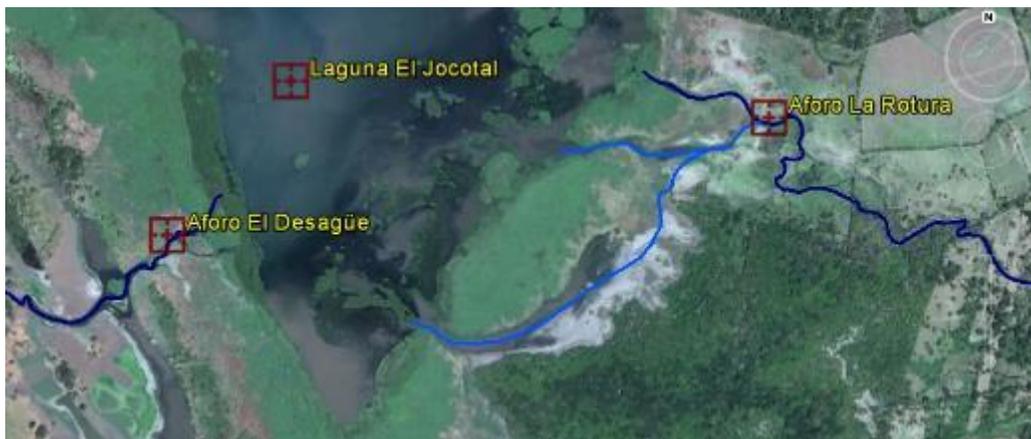
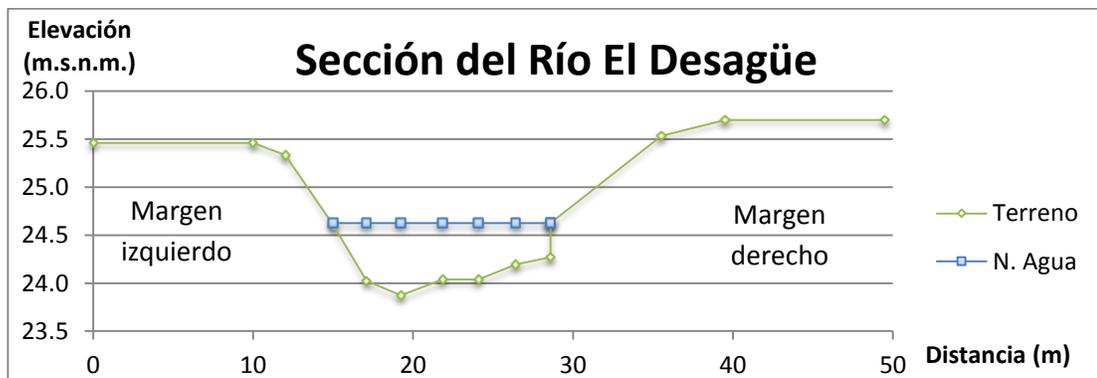
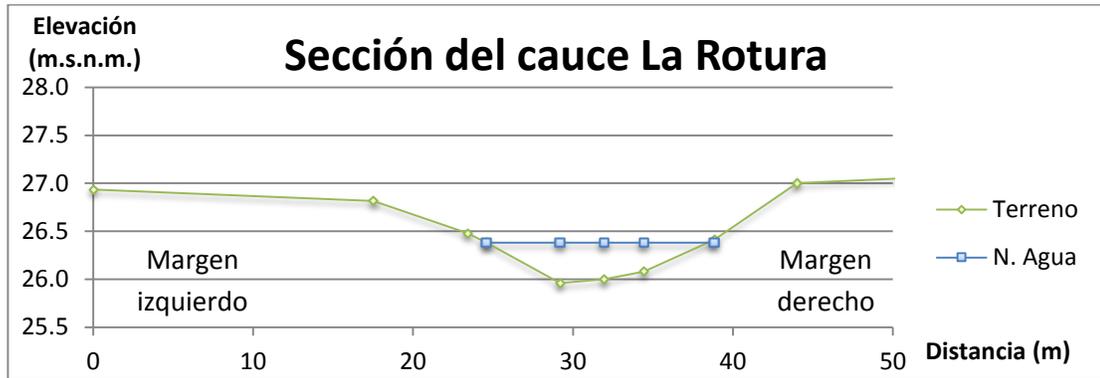


Imagen 4-9 Puntos de aforo en Río El Desagüe y cauce La Rotura.

Las secciones obtenidas son las siguientes:



Río El Desagüe 100m abajo de los muros norte.



Cauce La Rotura 500 m aguas arriba de su desembocadura en la Laguna El Jocotal.

Mediciones de aforos:

Tabla 4-7 Datos de aforos realizados.

Lugar:	Río El Desagüe		
Fecha:	21 de marzo del 2012		
Prueba	Vertical 1 (seg)	Vertical 2 (seg)	Vertical 3 (seg)
1	37.38	40.90	40.94
2	45.00	43.47	47.81
3	38.17	40.43	38.69
4	34.00	40.38	41.26
5	34.69	42.42	45.65
6	45.10	39.05	42.66
Nivel de laguna:	25.77 msnm		
Caudal:	1.315 m ³ /s		

Aforos realizados por los guardarecursos Leodán Ramírez y Amílcar López:

Lugar:	Río El Desagüe
Fecha:	24 de enero del 2013
Profundidad promedio:	1.14m
Prueba	Tiempo (seg)
1	54
2	54
3	55
4	Lectura descartada
5	56
Nivel de laguna:	25.89 msnm
Caudal:	2.753 m ³ /s

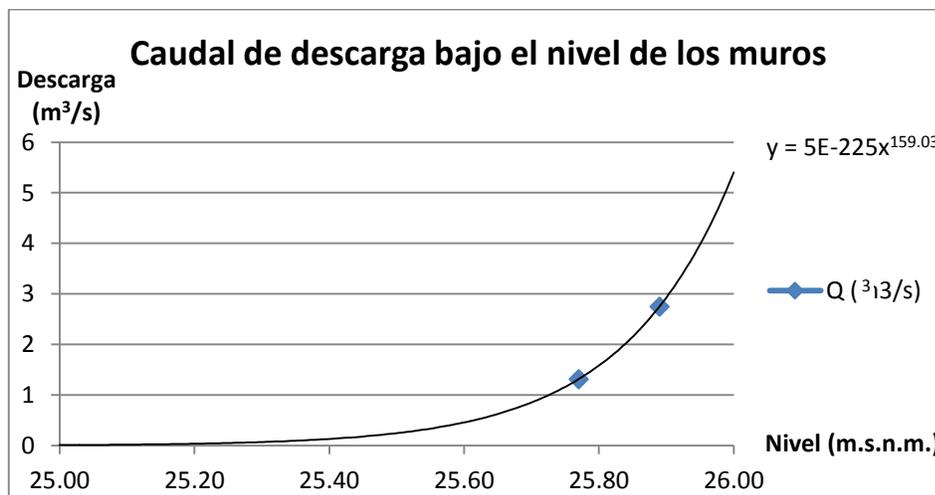
Lugar:	Cauce La Rotura
Fecha:	21 de enero del 2013
Profundidad promedio:	0.59m
Prueba	Tiempo (seg)
1	65
2	65
3	64
4	62
5	53
Caudal:	1.132 m ³ /s

Nota: El caudal resultante que se muestra está modificado por el factor multiplicador que indica la “Tabla 2-5 Factores de corrección de caudal para aforos con flotador.”, de la sección 2.4.4.3. del marco teórico.

Descarga bajo el nivel de los muros:

Tabla 4-8 Resultados de los aforos realizados.

Número de aforo	Nivel de laguna (m.s.n.m.)	Área Hidráulica del cauce (m²)	Descarga (m³/s)
1	25.77	7.180	1.3151
2	25.89	13.398	2.7531



Gráfica 4-5 Curva de descarga bajo el nivel de los muros. Laguna El Jocotal

Tabla 4-9 Descarga de la Laguna El Jocotal bajo el nivel de los muros.

Nivel de laguna (m.s.n.m.)	Descarga (m³/s)
24.50	0.0000
25.00	0.0103
25.10	0.0194
25.20	0.0366
25.30	0.0687
25.40	0.1286
25.50	0.2402
25.60	0.4475
25.70	0.8319
25.80	1.5428
25.90	2.8542
26.00	5.2678

2- Análisis de registros de nivel.

Para su análisis se consideró lo siguiente:

- No se tienen registros del caudal que descarga la laguna hacia el Río Grande de San Miguel.
- Los únicos registros de nivel existentes son los provenientes del limnómetro instalado en el muelle durante esta investigación.
- El registro de los niveles de la laguna se obtuvo mediante la colaboración de los guarda recursos, tomando lecturas de nivel dos veces al día, en horarios variables, pero que en promedio se daban a las 08:00 y a las 16:00 horas.
- La descarga se calculó en base a la siguiente ecuación básica:

$$\text{Descarga} = \frac{\text{Volumen}_2 - \text{Volumen}_1}{\text{Tiempo}_2 - \text{Tiempo}_1}$$

Donde:

Volumen1 y *Volumen2* = son los volúmenes obtenidos al aplicar la curva de almacenamiento al nivel superior e inferior respectivamente.

Tiempo2 – Tiempo1 = tiempo transcurrido entre ambos registros de nivel en segundos.

Para trazar la parte alta de la curva de descarga se utilizó la siguiente información:

Tabla 4-10 Nivel máximo registrado en Vado Marín durante 1998 y 2011.

Evento	Nivel en Vado Marín (m)	Control de calidad en Estación Vado Marín	Caudal en Estación Vado Marín (m ³ /s)	Q.Main (m ³ /s)	Nivel Laguna El Jocotal (msnm) ^c	Descarga Teórica El Jocotal (m ³ /s) ^d
Huracán Mitch	7.45	No	457.080	51.69 ^A	31.62	405.390
Depresión Tropical 12E	7.25	Sí	448.991	46.51 ^B	30.34	402.481

^A Según la tabla de ramificación de caudal del período 2003-2007.

^B Según la tabla de ramificación de caudal del año 2012.

^C Según marcas puestas por los guarda recursos de la zona.

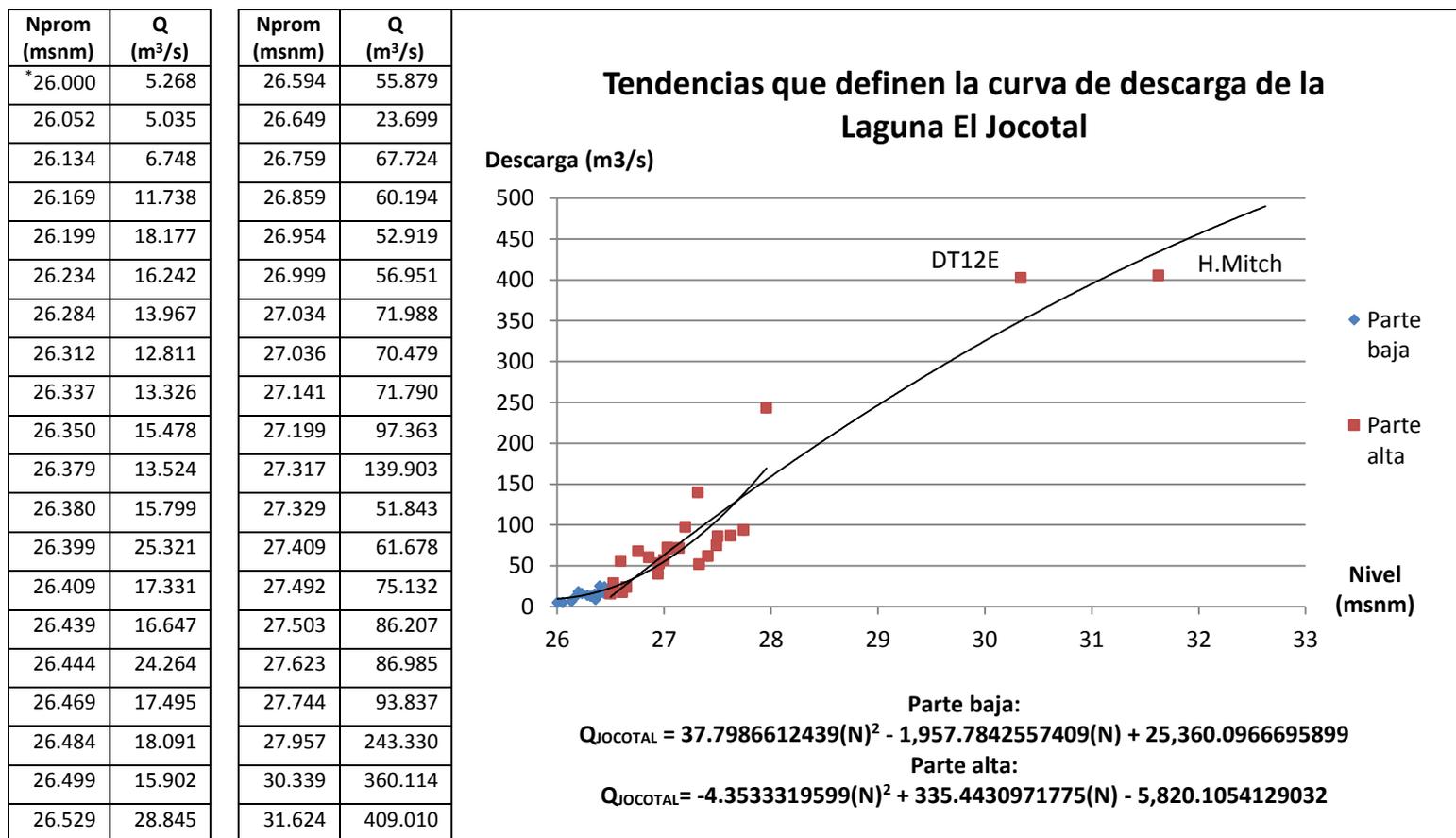
^D Según las conexiones entre sub cuencas: $Q_{Jocotal} = Q_{Marín} - Q_{Main}$

Se observa que para ambos eventos, los niveles y caudales registrados en Vado Marín son similares, sin embargo la planicie de inundación de la laguna tuvo una diferencia de nivel de 1.38 m, lo que indica que uno de los datos tiene un grado de error.

Debido a las causas anteriores no es posible saber cuál de ambos registros se encuentra más alejado de la realidad, por lo que ambos se utilizarán para dar una tendencia a la curva de descarga de la laguna.

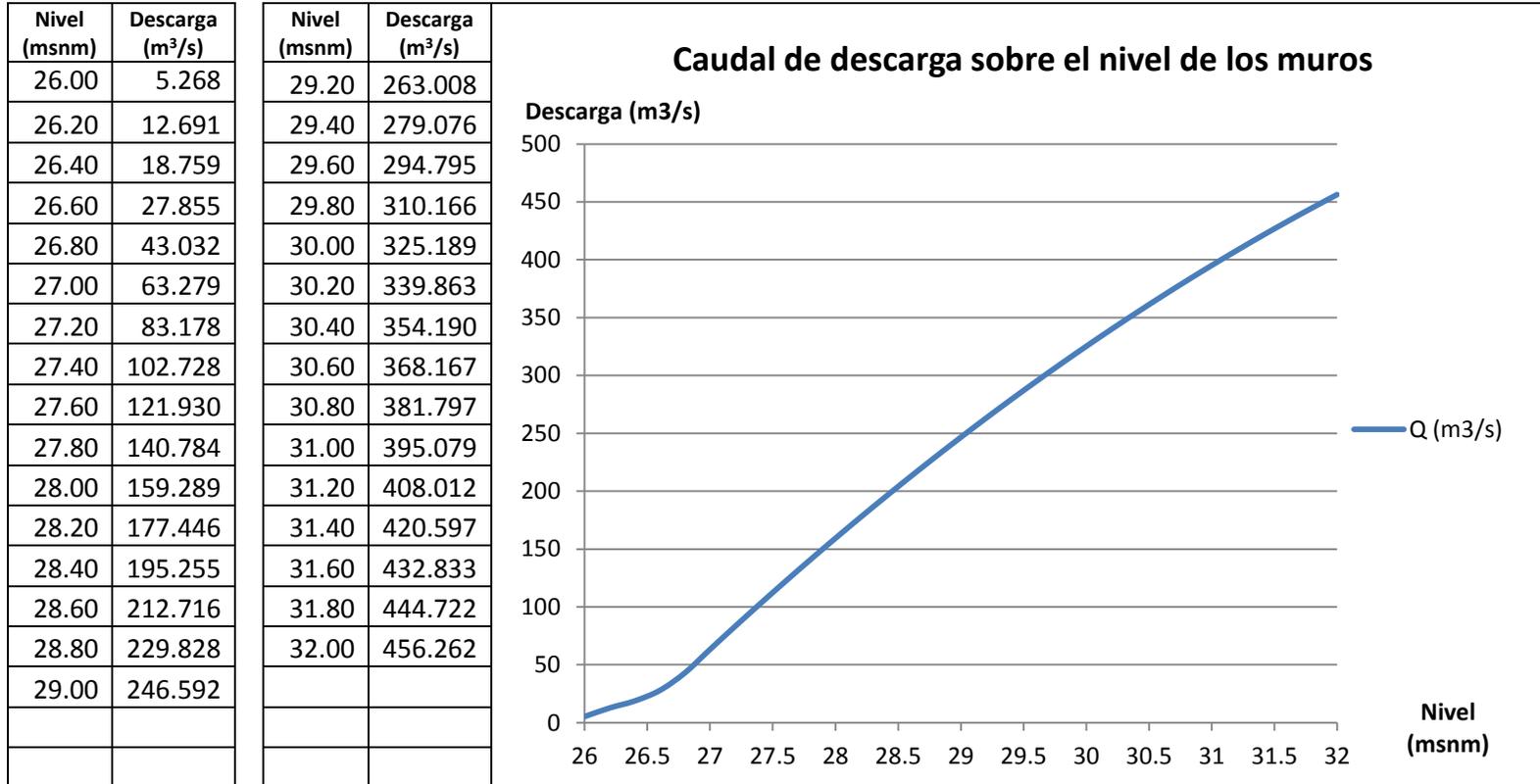
Los resultados del análisis de registros de nivel son los siguientes:

Tabla 4-11 Puntos de dispersión para trazar la curva de descarga. Laguna El Jocotal



* Último punto de la curva de descarga bajo los muros.

Tabla 4-12 Descarga de la Laguna El Jocotal sobre el nivel de los muros.



Habiendo obtenido la curva de descarga de la Laguna El Jocotal, se repite este procedimiento para la Laguna de Olomega. Su curva de descarga se encuentra en el Anexo 12.

4.3.6. Estimación del caudal de los manantiales que alimentan la Laguna El Jocotal.

Para estimar este caudal se utilizaron los tres aforos realizados durante la época seca con la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta \text{Almacenamiento}}{\Delta \text{Tiempo}} = Q_{\text{Almacenamiento}} = Q_{\text{Manantiales}} + Q_{\text{Rotura}} - Q_{\text{Desagüe}}$$

$$Q_{\text{Manantiales}} = Q_{\text{Almacenamiento}} - Q_{\text{Rotura}} + Q_{\text{Desagüe}}$$

Tabla 4-13 Estimación del caudal de los manantiales.

Según condiciones durante el aforo realizado en marzo de 2012	
Parámetro	Caudal (m ³ /s)
Almacenamiento (Incremento de nivel: 5mm)	0.6343
Rotura (sin flujo)	0.0000
Desagüe	1.3151
Manantiales	1.9494

Según condiciones durante el aforo realizado en enero de 2013	
Parámetro	Caudal (m ³ /s)
Almacenamiento (laguna con nivel constante)	0.0000
Rotura (con flujo)	1.1315
Desagüe	2.7531
Manantiales	1.6216

Finalmente estimamos el caudal de los manantiales como el promedio de los dos resultados anteriores:

$$Q_{\text{MANANTIALES}} = 1.7855 \text{ m}^3/\text{s}$$

Y este es el caudal de descarga utilizado en la subcuenca ficticia “Nacimientos”.

4.3.7. Varianza explicada.

La varianza explicada es el método con el que el Modelo HBV evalúa los resultados de la calibración a través de la siguiente ecuación:

$$R^2 = \frac{\sum(QR - QR_{mean})^2 - \sum(QC - QR)^2}{\sum(QR - QR_{mean})^2}$$

Donde:

QR = Caudal registrado.

QR_{mean} = Promedio de los caudales registrados.

QC = Caudal calculado o modelado.

Finalmente luego de ingresar toda la información presentada en los apartados anteriores: registros de precipitación, caudal, evaporación y niveles de lagunas; tablas de ramificación de caudal, curvas de almacenamiento y curvas de descarga, se obtienen los siguientes resultados para la varianza explicada en cada subcuenca:

Tabla 4-14 Resultados de la calibración del Modelo Hidrológico del RGSM.

Estación	R ² 1970-1981	R ² 2003-2007 y 2012	R ² Total
Villerías	0.78045	0.73021	0.76252
Puente Moscoso	0.81271	-	0.81271
Laguna de Olomega	0.90061	-	0.90061
La Canoa	0.89417	0.77913	0.85304
Laguna El Jocotal	-	0.87399	0.87399
Vado Marín	0.86153	0.89648	0.87260

Con estos resultados la calibración se da por correcta y se pasa a elaborar los distintos escenarios para las modelaciones hidrológicas.

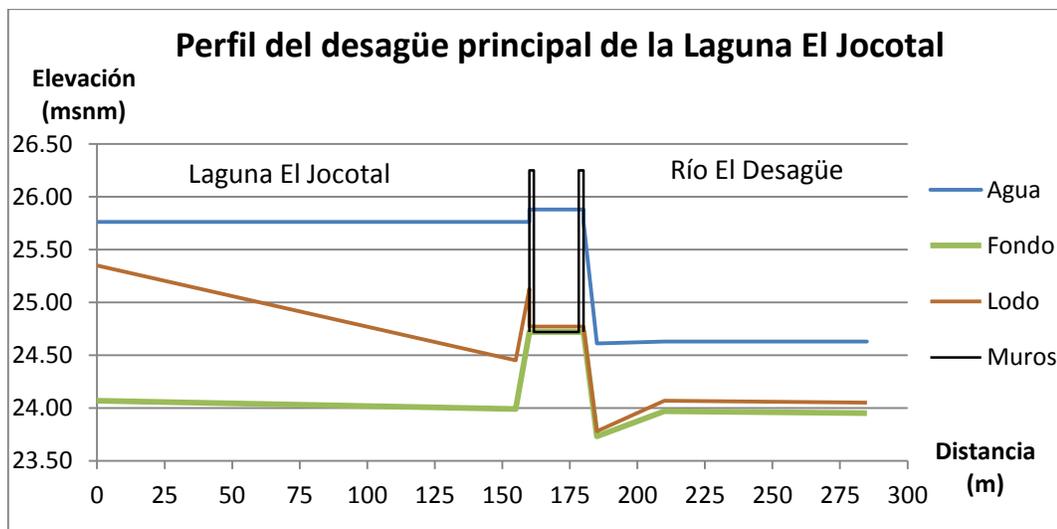
4.4. Escenarios de modelación.

Los escenarios de modelación se elaboran para evaluar el comportamiento de los niveles de la laguna, modificando tres variables consideradas como principales, estas son:

- 1- Existencia de Muros en río El Desagüe: Con esta variable se evalúa el supuesto de que los muros a la salida de la laguna sean retirados, ya que se observó que funcionan como un filtro que permite la circulación del agua y retiene el sedimento. Es por esto que podemos considerarlos como una de las causas del azolvamiento en la laguna.

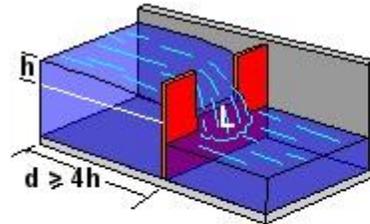
Para su retiro se consideró lo siguiente:

- El nivel de azolve en los muros es de 24.97 msnm, mientras que el nivel del fondo del terreno es de 24.00 msnm, esto implica que no puede simularse el retiro completo de los muros, pues se desconoce cómo se comportaría esta capa de 1 m de sedimento al existir descarga libre. Por esto, el nivel mínimo de descarga será de 25.00 msnm.
- Al no retirar los muros completamente la parte faltante funcionaría como un vertedero de pared gruesa.
- Ya que se desconocen los márgenes del terreno en la sección de los muros, se simulará un vertedero de sección rectangular.



Gráfica 4-6 Perfil de la Laguna El Jocotal y Río El Desagüe en la zona de los muros norte.

Datos requeridos para simular un vertedero según el software Hcanales 3.0:



Ecuación:

$$Q = C_d(L - 0.1nh)h^{\frac{3}{2}}$$

donde:

- Q = caudal que fluye por el vertedero, m³/s
- L = longitud de cresta del vertedero, m
- h = carga sobre el vertedero, m
- n = número de contracciones (0, 1 ó 2)
- C_d = coeficiente de descarga

Imagen 4-10 Esquema de un vertedero. Software Hcanales 3.0

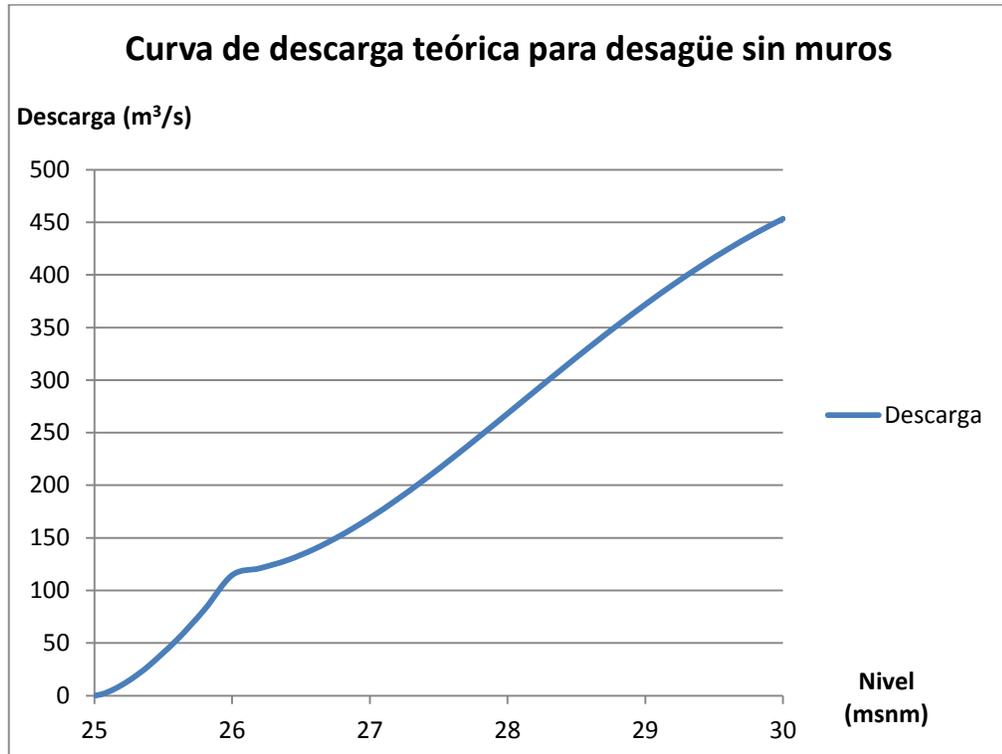
Tabla 4-15 Datos para simular el retiro de los muros norte y sur.

Muros	Longitud (m)	Carga sobre el vertedero (m)	Número de contracciones	Coficiente de descarga Para sección rectangular
Norte	51.0	1.0	0	1.45
Sur	28.0	1.0	0	1.45

Tabla 4-16 Curva de descarga teórica para simular el retiro de los muros.

Elevación	Descarga
25.00	0.0000
25.05	1.2807
25.10	3.6224
25.15	6.6547
25.20	10.2457
25.25	14.3188
25.30	18.8224
25.40	28.9791
25.60	53.2381
25.80	81.9653
26.00	114.5500
26.20	121.0602
26.40	128.7382
26.60	139.5902
26.80	153.1472
27.00	168.9632

Elevación	Descarga
27.20	186.6192
27.40	205.7212
27.60	225.9012
27.80	246.8182
28.00	268.1542
28.20	289.6202
28.40	310.9492
28.60	331.9022
28.80	352.2662
29.00	371.8522
29.20	390.4972
29.40	408.0662
29.60	424.4472
29.80	439.5552
30.00	453.3292



Gráfica 4-7 Curva de descarga teórica para simular el retiro de los muros en Laguna El Jocotal.

- 2- Flujo a través del RGSM: evalúa si existe un caudal circulando a través del cauce del río entre las estaciones La Canoa y Vado Marín.
- 3- Flujo a través de La Rotura: evalúa si existe un caudal circulando a través del cauce La Rotura.

Estas dos variables son dependientes entre sí, y para evaluarlas se utilizan las siguientes tablas de ramificación de caudal:

- a) Flujo a través del RGSM y a través de La Rotura durante todo el año: se utilizó la tabla de ramificación de caudal del año 2012 – 2013, año hidrológico en que se presentaron estas condiciones.
- b) Flujo a través del RGSM y a través de La Rotura durante la época lluviosa: se utilizaron las tablas de ramificación de caudal de los años 1977-1978 y 2006-2007.
- c) Sin flujo a través del RGSM, todo el caudal se dirige a través del cauce La Rotura: para este arreglo se considera " $Q_{Main} = 0$ ".

Estas tablas de ramificación de caudal se encuentran en el Anexo 8.

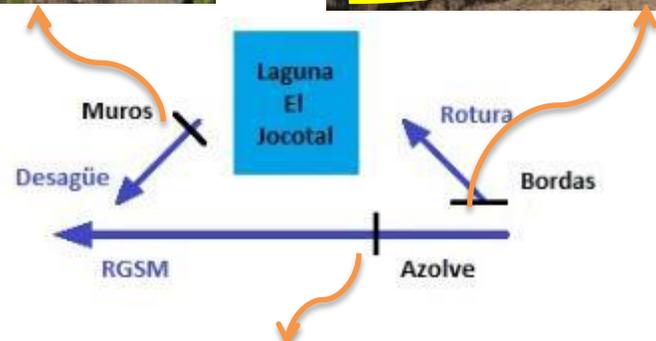


Imagen 4-11 Esquema de las variables de los escenarios modelados.

Los escenarios evaluados provienen de la combinación de las variables anteriores:

Tabla 4-17 Escenarios modelados.

VARIABLES/ESCENARIO:	Escenario Natural	Escenario 1 (E1)	Escenario 2 (E2)	Escenario 3 (E3)	Escenario 4 (E4)	Escenario 5 (E5)	Escenario 6 (E6)
Existencia de muros:	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	No
Flujo a través de RGSM:	Varía	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No
Flujo a través de La Rotura:	Varía	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí

Escenario Natural: Es el escenario que considera las condiciones reales que se presentaron entre el río y la laguna durante el período de estudio.

E1: Estas condiciones se presentaron entre los años 2010 y 2012 y considera la existencia de muros, flujo a través del RGSM y flujo a través del cauce La Rotura mientras el río mantenga un nivel suficiente para alimentarlo.

E2: Estas condiciones son las que se tuvieron desde la construcción del desagüe artificial en la década de los 60's, hasta el año 2006 en que se formó el cauce La Rotura, y considera la existencia de muros, flujo a través del RGSM y flujo a través del cauce La Rotura solo por desborde.

E3: Estas son las condiciones que se tuvieron entre los años 2006 – 2010 ya que el flujo a través del RGSM se vio interrumpido por un azolvamiento en su cauce.

E4, E5 y E6 son similares a E1, E2 y E3 respectivamente, pero evalúan el retiro de los muros en el Río El Desagüe.

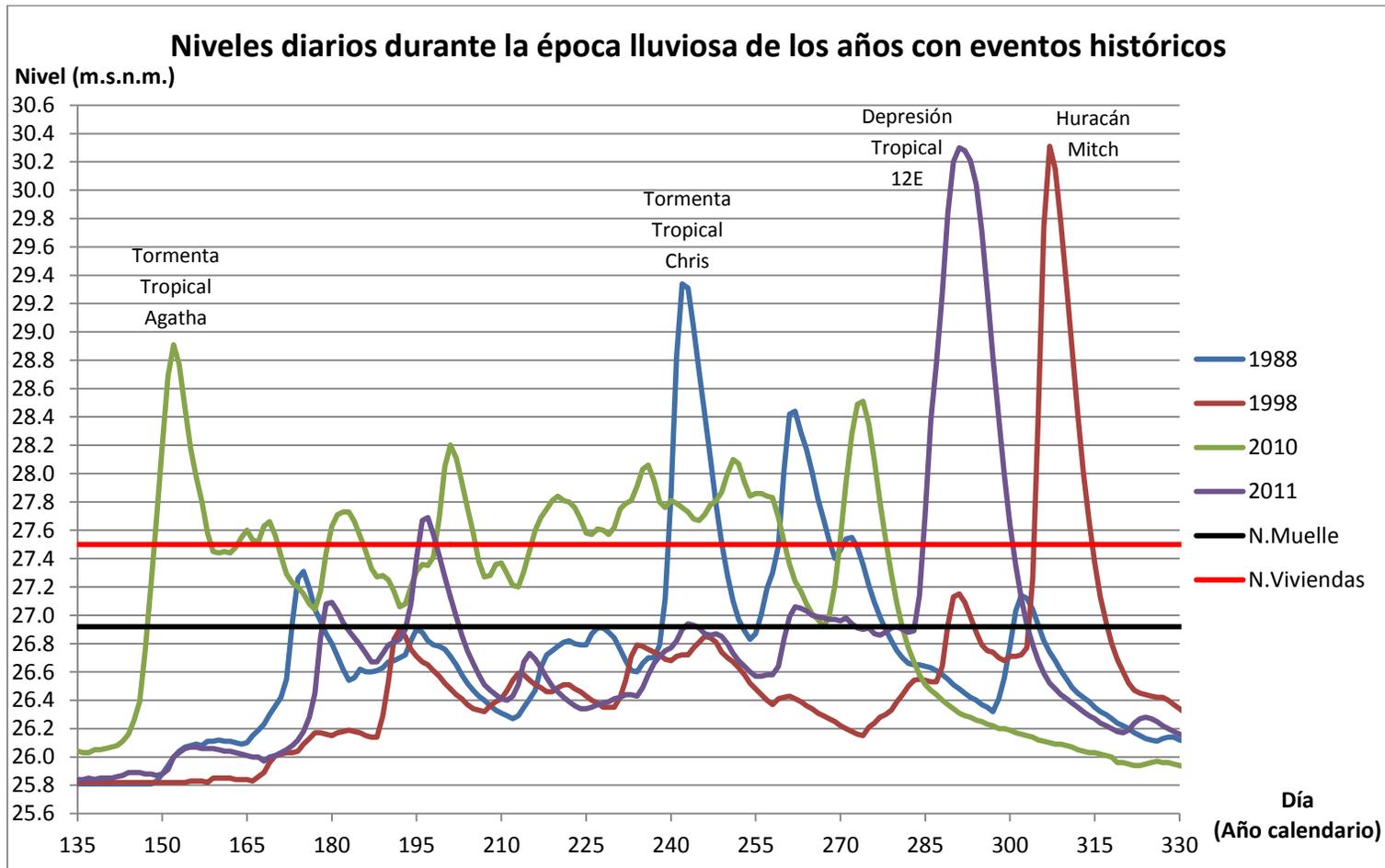
Tabla 4-18 Resultados de modelación del escenario natural durante los eventos máximos históricos.

Evento	Duración del evento	Fecha del Nivel Máximo	Nivel (m.s.n.m.)	
			Marca ¹	Simulado ²
Tormenta Tropical Chris	24-Ago_30-Ago-1988	29-Ago-1988	-	29.34
Huracán Mitch	29-Oct_04-Nov-1998	03-Nov-1998	31.62	30.31
Tormenta Tropical Agatha	24-May_01-Jun-2010	01-Jun-2010	29.48	28.91
Depresión Tropical 12E	10-Oct_20-Oct-2011	18-Oct-2011	30.34	30.30

1- Marcas puestas por los guarda recursos.

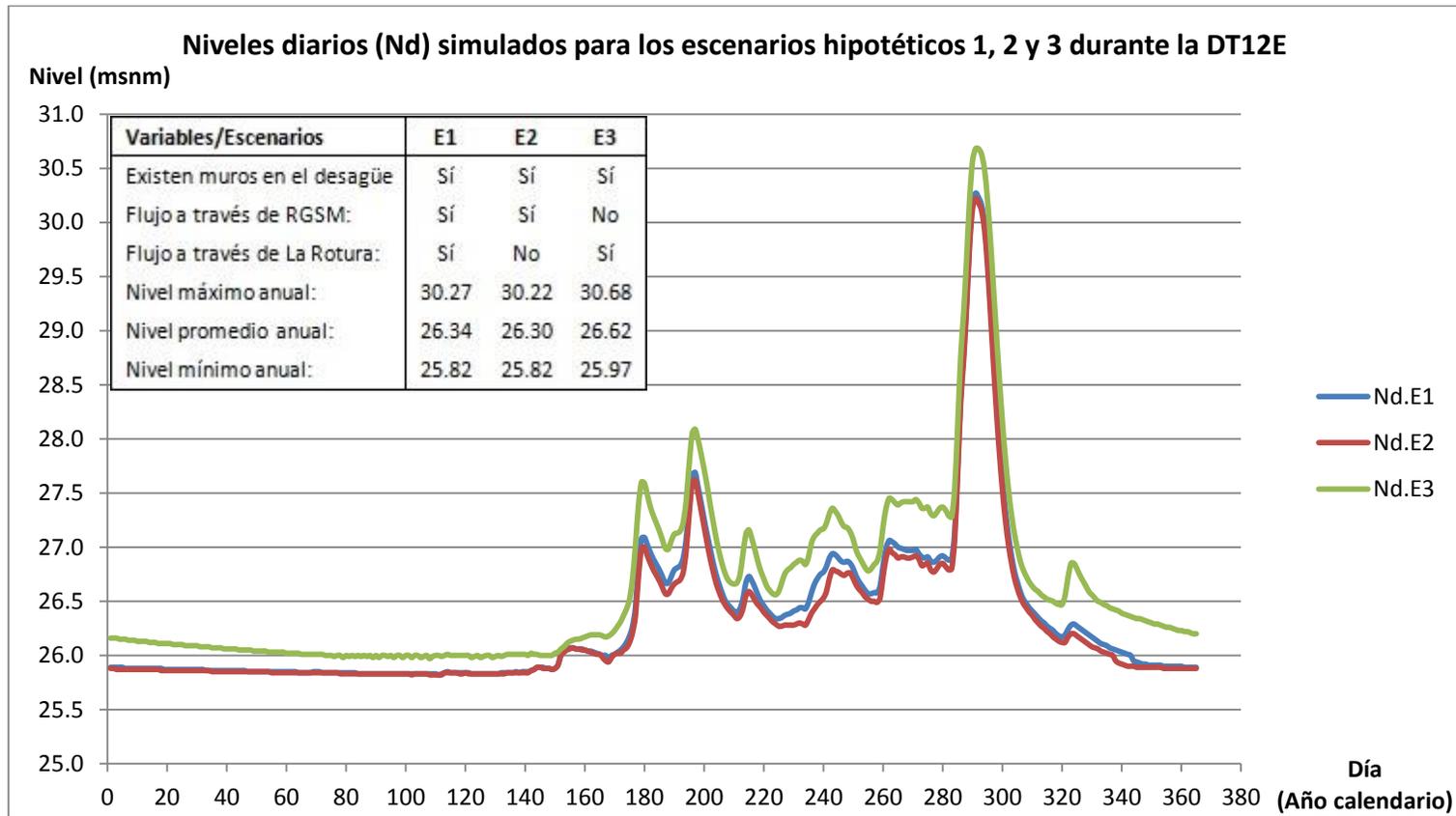
2- Nivel máximo simulado por el modelo para dicho evento en el escenario natural.

La simulación de la Depresión Tropical 12E proporciona resultados bastante cercanos a los registros reales, por lo que se eligió para comparar el comportamiento de la laguna durante los 6 escenarios hipotéticos.



Gráfica 4-8 Modelación de los eventos máximos históricos que han afectado la Laguna El Jocotal.

Los respectivos mapas de inundación de estos eventos se pueden encontrar en Anexo 13, Anexo 14, Anexo 15 y Anexo 16.

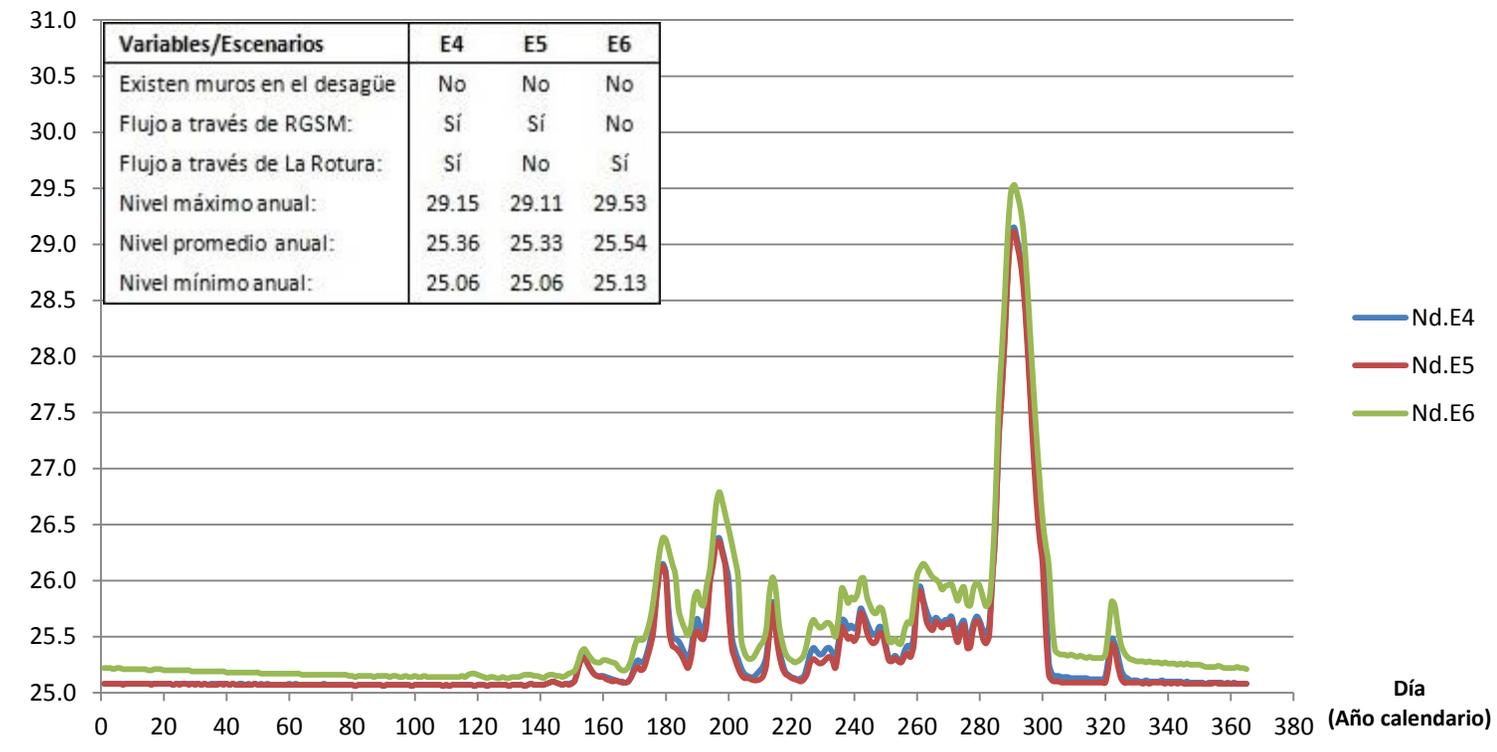


Gráfica 4-9 Simulación de la DT12E. Escenarios 1, 2 y 3.

Observaciones:

- No se tienen diferencias significativas entre los niveles simulados para E1 y E2, lo que significa que la influencia de La Rotura es mínima cuando existe flujo a través del cauce principal del RGSM.
- Los niveles simulados en E3 superan en promedio por 0.30 m a los del escenarios E1 y E2.

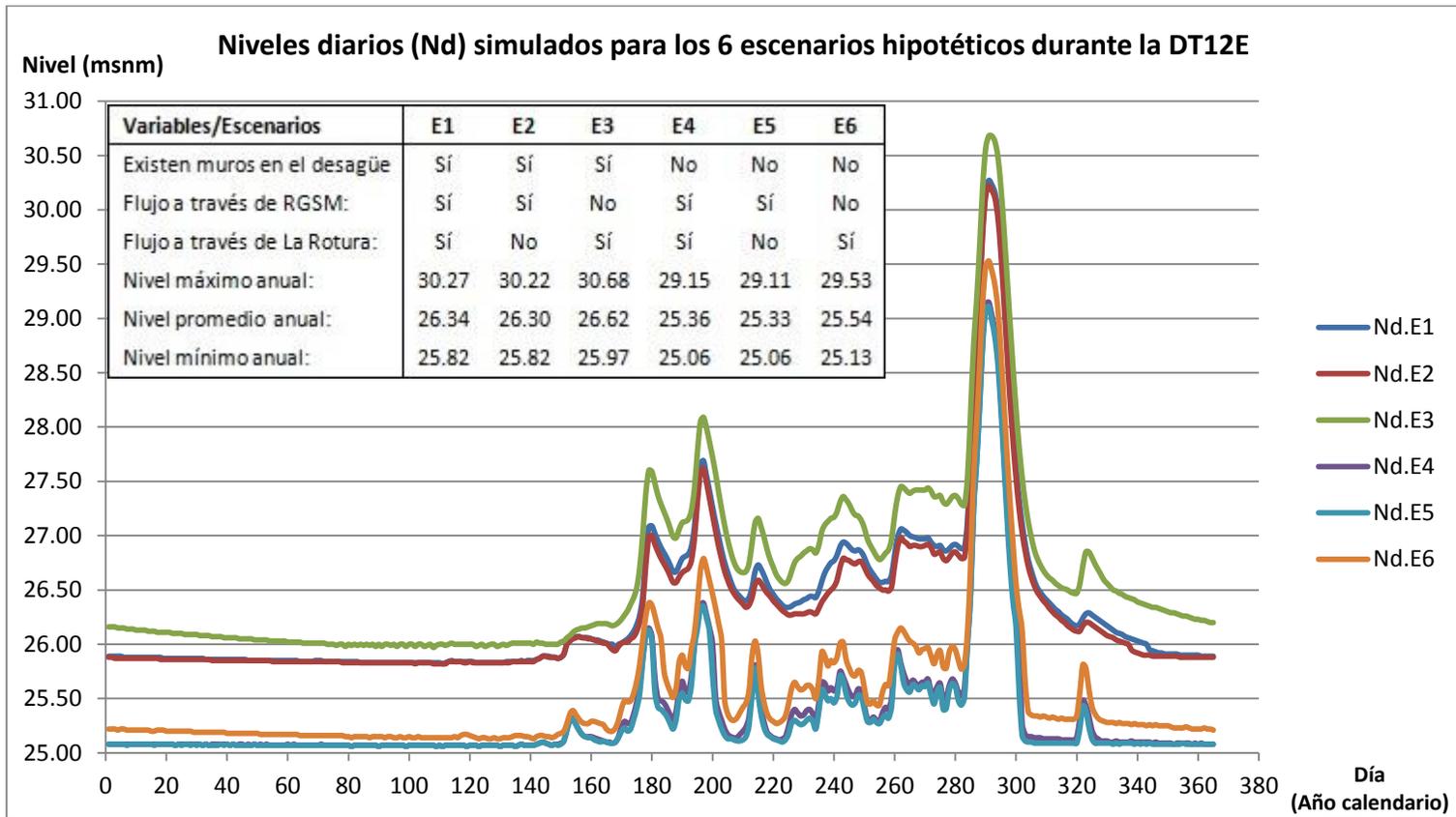
Nivel (msnm) Niveles diarios (Nd) simulados para los escenarios hipotéticos 4, 5 y 6 durante la DT12E



Gráfica 4-10 Simulación de la DT12E. Escenarios 4, 5 y 6.

Observaciones:

- Encontramos que la influencia de La Rotura es mínima cuando el RGSM no se encuentra azolvado (E4 y E5 son similares a E1 y E2). La situación más desfavorable en lo que respecta a inundaciones se presenta en E6.
- Los escenarios modelados con muros en el desagüe (E1, E2 y E3) presentan niveles superiores en promedio 1 metro a los niveles de los escenarios modelados sin muros (E4, E5 y E6).



Gráfica 4-11 Simulación de la DT12E. Escenarios 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

4.5. Conclusiones del capítulo.

- 1- En base a la modelación del escenario natural, todos los años se supera el nivel del muelle del caserío El Borbollón, lo que indica que siempre se presentan inundaciones cuyas extensiones geográficas dependen de qué tan copiosa sea la época lluviosa.
- 2- También de la modelación del escenario natural se confirmó que los eventos meteorológicos que produjeron las mayores inundaciones en la Laguna El Jocotal, durante el período 1970 – 2012 fueron: Tormenta Tropical Chris en 1988, Huracán Mitch en 1998, Tormenta Tropical Agatha en 2010 y Depresión Tropical 12E en 2011.
- 3- Según la comparación de los niveles modelados en los escenarios E1 y E2, el cauce “La Rotura” no representa un factor importante en la problemática de inundaciones cuando el Río Grande de San Miguel se encuentre desazolvado, pues en promedio la diferencia de los niveles sería de 4 centímetros a lo largo del año.
- 4- Los resultados obtenidos de los escenarios sin muros indican que aunque se disminuirían en promedio 1 metro los niveles alcanzados por la laguna durante las inundaciones, éstos descenderían hasta niveles críticos durante la época seca, reduciendo considerablemente el área del espejo de agua y disminuyendo la profundidad efectiva hasta alcanzar unos 10 centímetros.
- 5- El escenario E3 es el más desfavorable para la problemática de inundaciones, ya que al dirigir todo el caudal del Río Grande de San Miguel a través de la Laguna El Jocotal, esta incrementa sus niveles sobre la variación natural, un promedio de 0.30 metros durante todo el año, y hasta 0.5 metros para eventos meteorológicos fuertes. Por lo tanto, se concluye que el azolvamiento del Río Grande de San Miguel ha sido el causante de la problemática de inundaciones durante la última década.

CAPÍTULO 5

BALANCE HÍDRICO

En el presente capítulo se abordarán los cálculos realizados, para determinar los componentes del balance hídrico en el área de la cuenca de la Laguna El Jocotal.

En el balance hídrico no se aborda la problemática de inundación de la laguna. Más bien lo que se pretende estudiar, son los volúmenes de agua que se manejan en la cuenca, para tener un indicio de si existe exceso o escasez en el acuífero.

5.1. Delimitación de la cuenca.

La cuenca de la Laguna El Jocotal tiene una superficie de 289.53km² y abarca desde la parte exterior sur del cráter del Volcán de San Miguel, extendiéndose por todo el cono y faldas del mismo, siguiendo por las planicies del valle del Rio Grande de San Miguel, hasta la cima de las montañas de la cordillera de Jucuarán.



Imagen 5-1 Subcuenca de la Laguna El Jocotal.

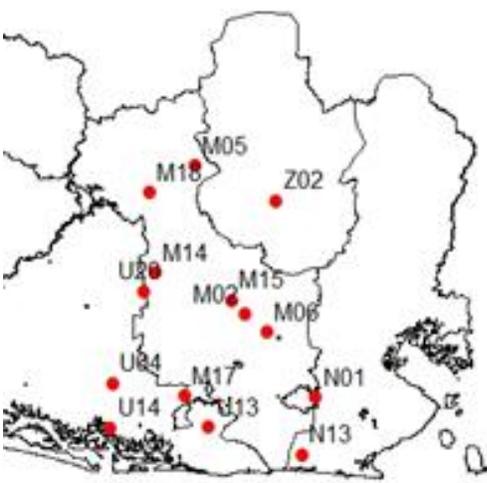
5.2. Componentes del Balance Hídrico

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los componentes del balance hídrico en la investigación realizada en la Laguna El Jocotal.

5.2.1. Precipitación (P)

Este parámetro se determinó en base a los registros de precipitación acumulada diaria, de las estaciones pluviométricas situadas en el oriente del país, y que tienen influencia sobre la cuenca de la laguna. A continuación se muestra la ubicación de estas estaciones.

Tabla 5-1 Estaciones meteorológicas utilizadas para el periodo de estudio.

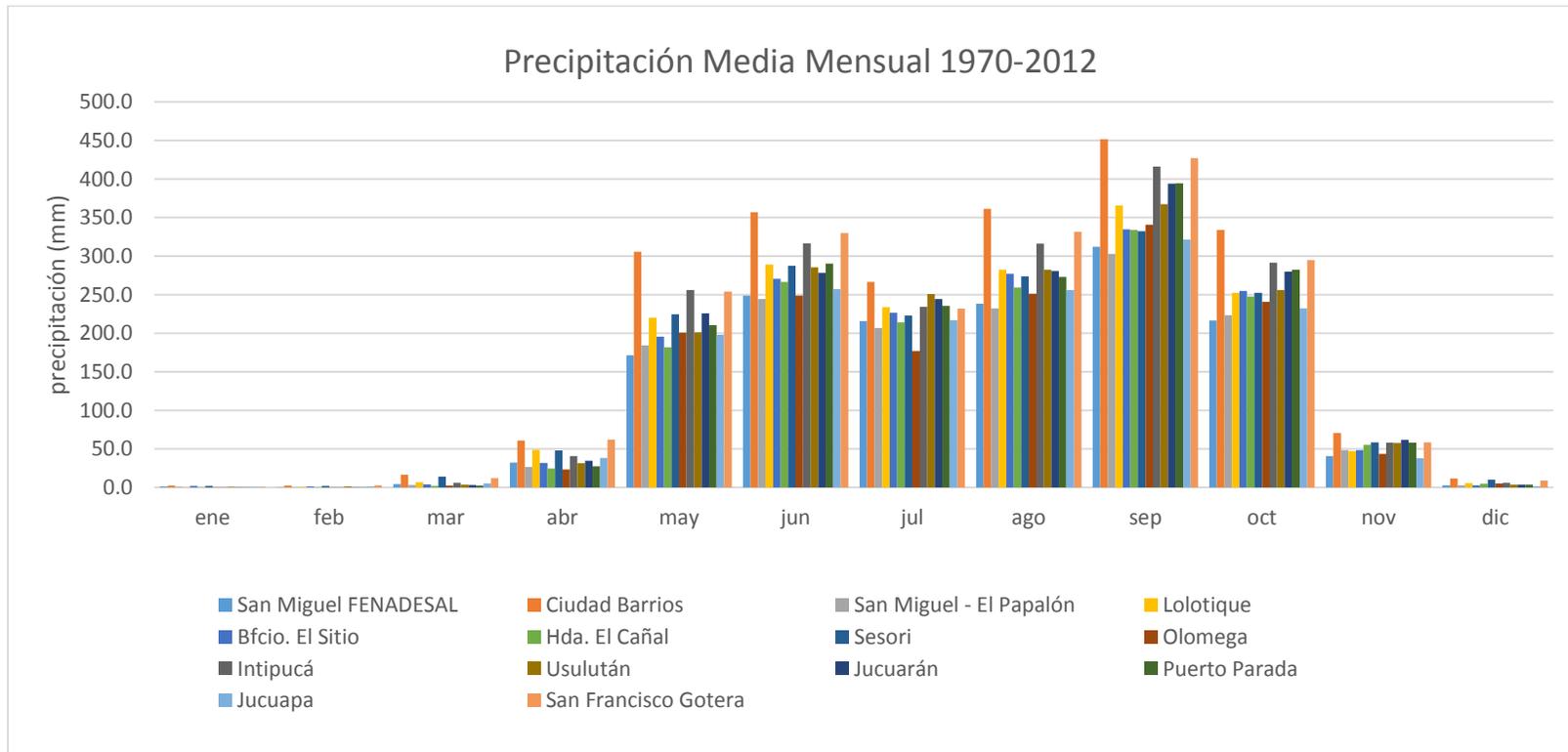


Código	Estación	X	Y
M02	San Miguel FENADESAL	589683.93	261854.941
M05	Ciudad Barrios	578759.771	293900.353
M06	San Miguel El Papalón	594573.25	257999.17
M14	Lolotique	588122.86	243228.003
M15	Beneficio El Sitio	586786.898	264795.072
M17	Hacienda El Cañal	574947.877	303292.159
M18	Serori	583085.825	293729.441
N01	Olomega	605279.07	243843.07
N13	Intipucá	602257.66	231477.56
U04	Usulután	560846.784	246837.477
U13	Jucuarán	581823.81	237305.58
U14	Puerto Parada	560327.315	237248.89
U20	Jucuapa	567477.89	266764.99
Z02	San Francisco Gotera	596630.38	286401.309

Para estas estaciones se calcula la precipitación media mensual para el período de estudio (1970-2012)

Tabla 5-2 Precipitación media mensual.

Código	Estación	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
M02	San Miguel FENADESAL	1.3	0.6	4.6	32.6	171.4	248.9	215.9	238.3	312.3	216.5	40.9	3.1
M05	Ciudad Barrios	2.4	2.6	16.5	61.1	305.7	357.1	266.6	361.5	451.7	334.0	70.8	11.8
M06	San Miguel - El Papalón	1.1	0.4	3.5	26.7	184.2	244.5	207.0	232.4	303.1	223.4	48.4	3.1
M14	Lolotique	0.6	1.1	7.0	49.1	220.1	289.1	233.8	282.2	365.6	252.5	47.5	5.7
M15	Bfcio. El Sitio	2.1	1.5	4.3	32.2	195.5	270.5	226.6	277.2	334.8	254.9	48.7	3.0
M17	Hda. El Cañal	0.4	0.4	2.1	24.9	181.9	266.8	214.1	259.5	333.8	247.5	55.3	4.8
M18	Sesori	2.3	2.1	14.4	48.3	224.7	287.7	223.1	273.8	332.2	252.6	58.5	10.4
N01	Olomega	0.4	0.1	2.5	23.5	201.1	249.0	177.0	251.4	340.6	240.9	43.6	5.5
N13	Intipucá	0.5	0.7	6.1	40.8	256.2	316.6	234.5	316.4	416.3	291.6	58.4	6.3
U04	Usulután	0.9	1.2	3.6	31.6	201.5	285.4	250.7	282.4	367.4	256.3	57.8	3.8
U13	Jucuarán	0.4	0.5	3.4	34.8	226.1	278.2	244.4	280.9	393.9	280.1	61.9	3.8
U14	Puerto Parada	0.3	0.2	2.7	27.4	210.7	290.6	235.5	273.2	394.3	282.4	58.3	3.7
U20	Jucuapa	0.8	1.3	5.3	38.4	197.9	257.3	217.1	256.1	321.5	232.3	38.1	1.9
Z02	San Francisco Gotera	1.0	2.9	12.3	62.1	254.1	329.8	232.0	331.5	427.2	294.7	58.7	9.1

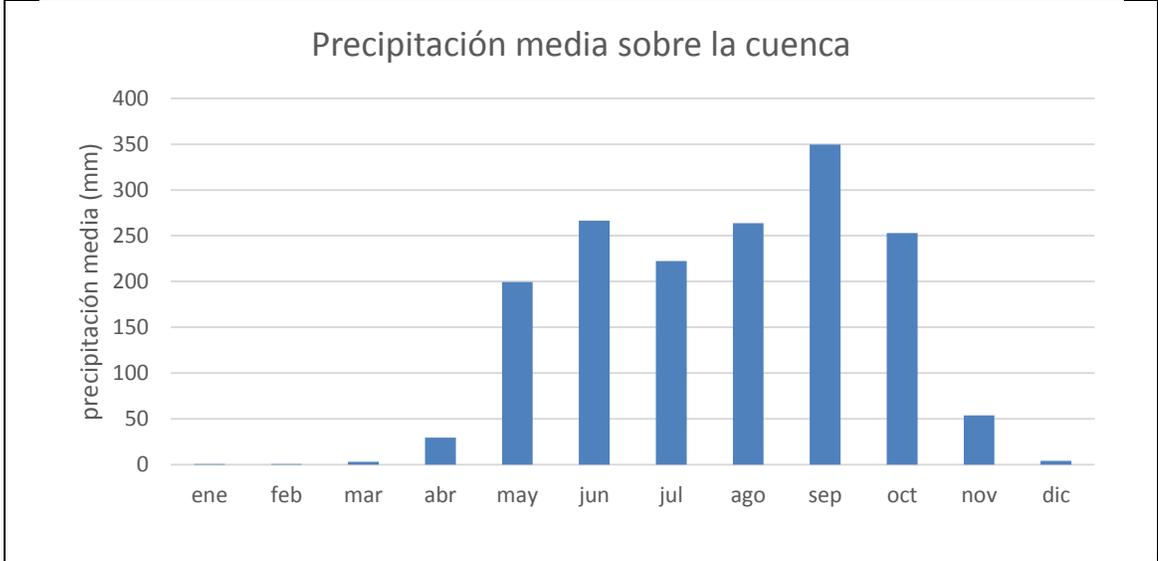


Gráfica 5-1 Precipitación media mensual.

Con estos datos, se elaboran las curvas isoyetas (Anexo 17) para el área de influencia de las estaciones, con el fin de determinar la precipitación media mensual sobre la cuenca.

Tabla 5-3 Precipitación media sobre la cuenca de la Laguna El Jocotal.

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Ppm	0.6	0.5	2.9	29.6	199.5	266.6	222.5	263.8	349.6	253.0	53.9	4.0

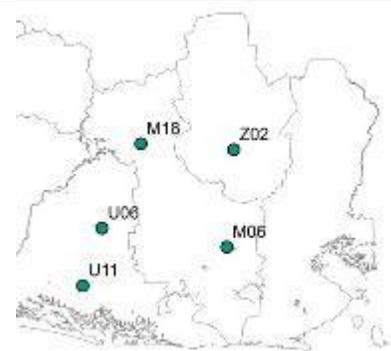


5.2.2. Evapotranspiración + Evaporación (E)

Para la determinación de la evaporación y la evapotranspiración se dispone de cinco estaciones cercanas a la cuenca de la laguna en las cuales se tienen registros de Evapotranspiración potencial media calculados por el método de Hargreaves en base a los registros de temperaturas que se tienen de dichas estaciones.

Tabla 5-4 Ubicación de las estaciones para trazar las curvas de evapotranspiración.

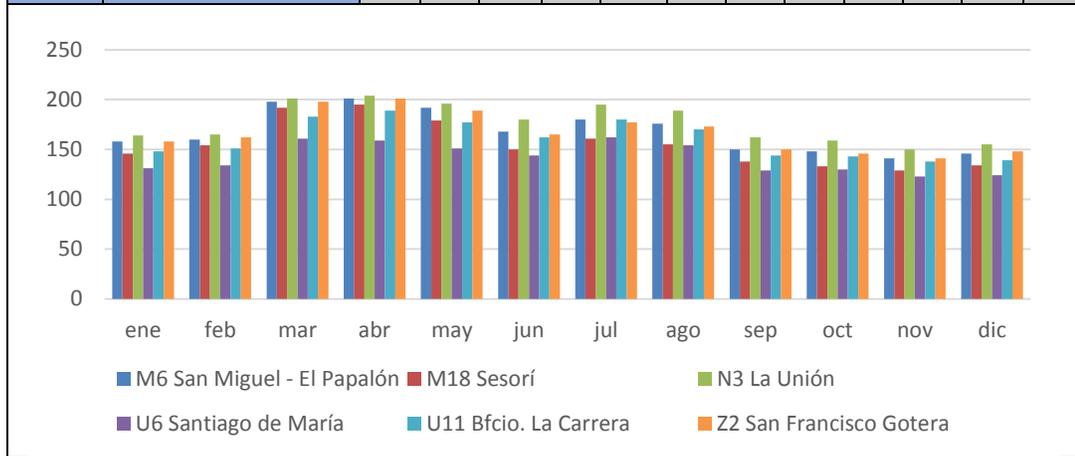
Estaciones con datos de evapotranspiración potencial calculada.			
Código	Estación	X	Y
M06	San Miguel - El Papalón	594572.813	257262.933
M18	Sesorí	568862.370	288156.703
U06	Santiago de María	557200.465	262869.543
U11	Bfcio. La Carrera	551460.161	245711.012
Z02	San Francisco Gotera	596630.380	286401.309



Se cuenta con los datos promedio mensuales del período 1970 – 2001.

Tabla 5-5 Evapotranspiración potencial media mensual 1970-2001

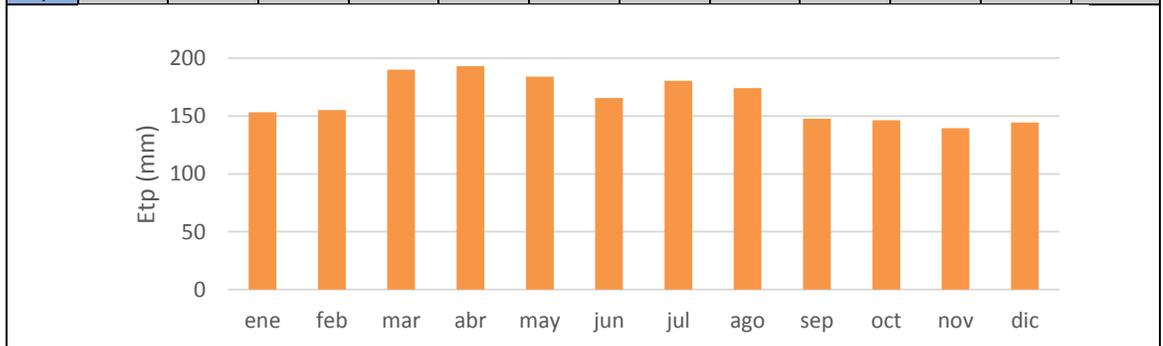
Código	Nombre	ene	feb	mar	abr	may	jun	Jul	ago	sep	oct	nov	dic
M6	San Miguel - El Papalón	158	160	198	201	192	168	180	176	150	148	141	146
M18	Sesori	146	154	192	195	179	150	161	155	138	133	129	134
N3	La Unión	164	165	201	204	196	180	195	189	162	159	150	155
U6	Santiago de María	131	134	161	159	151	144	162	154	129	130	123	124
U11	Bfcio. La Carrera	148	151	183	189	177	162	180	170	144	143	138	139
Z2	San Francisco Gotera	158	162	198	201	189	165	177	173	150	146	141	148



Con estos datos obtenemos la evapotranspiración potencial promedio sobre la cuenca, utilizando el método de las isoyetas para ponderar las isolíneas de evapotranspiración potencial (Anexo 18).

Tabla 5-6 Evapotranspiración potencial media sobre la cuenca de la Laguna El Jocotal.

mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
etp	153.1	155.1	190.0	193.2	184.0	165.6	180.4	174.1	147.7	146.4	139.4	144.4



5.2.2.1. Evapotranspiración Real sobre la cuenca.

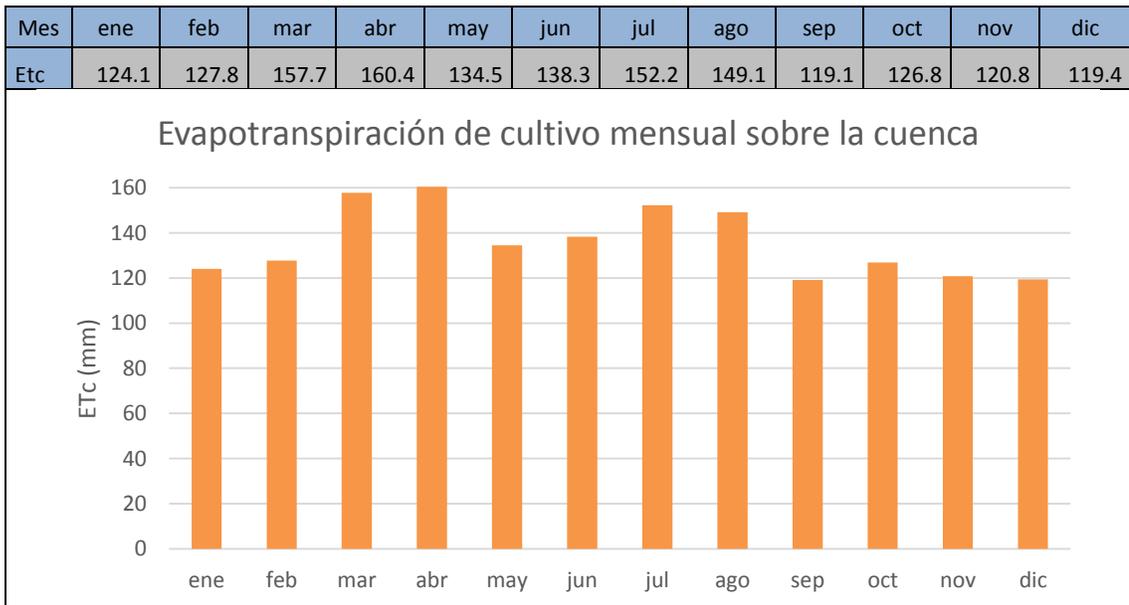
La evapotranspiración real que existe en la cuenca varía según el tipo de vegetación de cada zona. En el Anexo 19 se muestra el mapa de uso de suelos de la cuenca de la Laguna El Jocotal, en este mapa la cuenca se subdivide en áreas con un mismo tipo de vegetación a las cuales corresponde un coeficiente de cultivo “*kc*”, utilizado para determinar la evapotranspiración de cultivo, estas áreas se muestran en el Anexo 20, acompañados del coeficiente correspondiente a cada mes del año.

- Evapotranspiración de cultivo en la cuenca.

Haciendo uso de los datos de evapotranspiración potencial media sobre la cuenca y de los coeficientes “*kc*” se calcula la evapotranspiración de cultivo para cada mes del año. Por último y para unificar los datos en el área de la cuenca, se determina la evapotranspiración de cultivo promedio. La tabla con estos resultados se encuentra en Anexo 21 y Anexo 22.

Finalmente se obtiene la evapotranspiración de cultivo mensual promedio para la cuenca:

Tabla 5-7 Evapotranspiración de cultivo mensual sobre la cuenca de la Laguna El Jocotal.



- Cálculo de la evapotranspiración real sobre la cuenca.

En el cálculo de la evapotranspiración real influyen tres factores importantes, estos son: la evapotranspiración de cultivo, la precipitación y la reserva de agua en el terreno, la ecuación para su determinación es la siguiente.

$$Etr = \begin{cases} si\ Etc < P + res_{i-1}, Etr = ETC \\ si\ Etc > P + res_{i-1}, Etr = P + res \end{cases}$$

Donde:

Etr = Evapotranspiración Real.

Etc = Evapotranspiración potencial.

P = Precipitación.

res_{i-1} = Reserva del período anterior.

Cálculo de la reserva (res).

$$res_i = \begin{cases} si\ (P - Etr) + res_{i-1} < SAT, res_i = (P - Etr) + res_{i-1} \\ si\ (P - Etr) + res_{i-1} > SAT, res_i = SAT \end{cases}$$

Donde:

res_i = Reserva del período considerado.

Etr = Evapotranspiración real.

res_{i-1} = Reserva del período anterior al considerado.

P = Precipitación.

SAT = Reserva de agua útil.

Para determinar este término se toma en cuenta la reserva de agua útil que puede almacenar el suelo en la cuenca, esta se determinó mediante la siguiente tabla elaborada por la FAO (Organización de Alimentos y Agricultura, por sus siglas en inglés) y en la que se pueden encontrar los valores aproximados para los distintos tipos de suelo.

Tabla 5-8 Capacidad de agua disponible por pie de profundidad, según la textura del suelo.

Textura	Capacidad de agua disponible (agua por pie de profundidad)		
	(%)	(pulg.)	(mm)
Arena media	5.1	0.9	22.86
Arena fina	6.2	1.1	27.94
Franco arenoso	7.9	1.4	35.56
Franco arenoso fino	10.2	1.8	45.72
Franco	11.3	2.0	50.80
Franco limoso	11.9	2.1	53.34
Franco arcilloso	11.3	2.0	50.80
Arcilloso	7.9	1.4	35.56

Fuente: (Universidad de El Salvador, 2005)

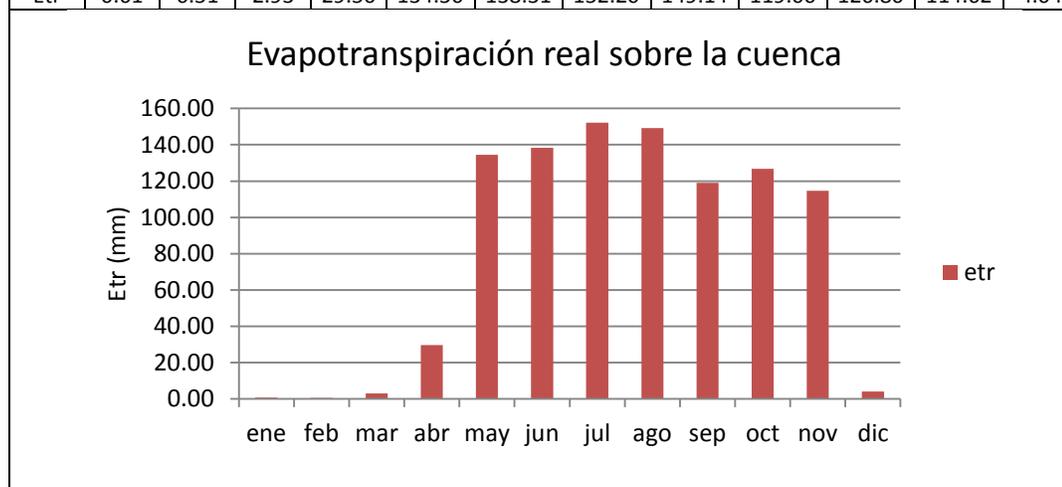
En El Salvador es recomendable usar 2 pies como capa de suelo saturada por lo que el valor de capacidad de agua disponible para los suelos de nuestra región se considera como dos veces el valor proporcionado por la tabla.

Para el cálculo de la capacidad de agua disponible se ponderaron los valores para cada tipo de suelo existente en la cuenca, dando como resultado: $SAT = 60.68 \text{ mm}$ (Anexo 23)

Una vez obtenido el valor de la reserva de agua útil se procede a calcular la reserva y la evapotranspiración real para cada mes del año, asumiendo que para el mes de enero la reserva del período anterior es igual a cero.

Tabla 5-9 Evapotranspiración real sobre la cuenca de la Laguna El Jocotal.

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
res	0.00	0.00	0.00	0.00	60.68	60.68	60.68	60.68	60.68	60.68	0.00	0.00
SAT	60.68	60.68	60.68	60.68	60.68	60.68	60.68	60.68	60.68	60.68	60.68	60.68
Etr	0.61	0.51	2.93	29.56	134.50	138.31	152.20	149.14	119.06	126.80	114.62	4.04

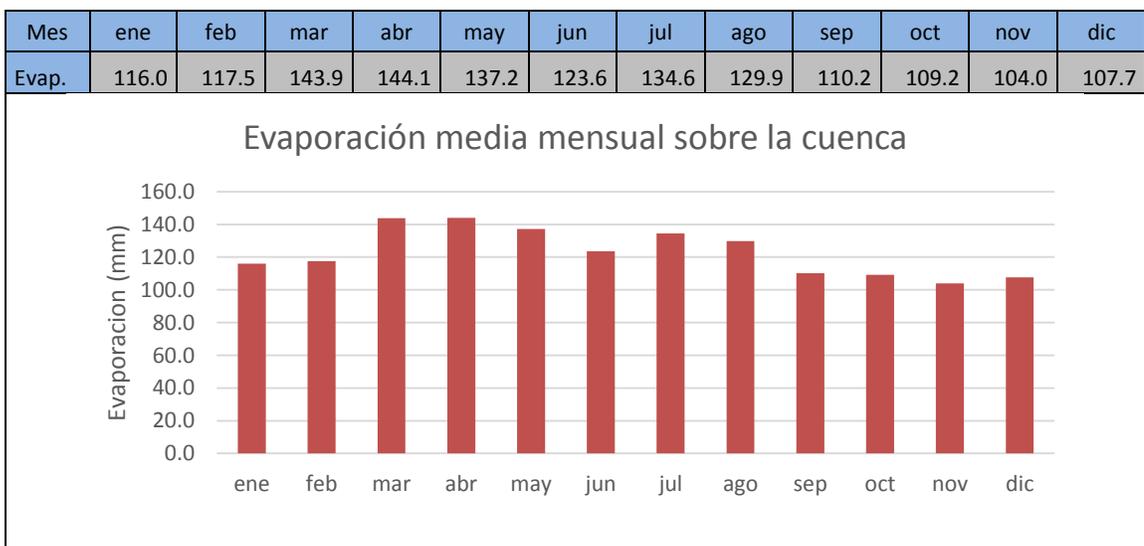


5.2.2.2. Evaporación en cuerpos de agua y zonas urbanas.

No se pudo contar con registros de evaporímetros colocados en el área cercana a la cuenca de la laguna, ya que en las estaciones meteorológicas no existen estos aparatos. En su defecto, se optó por estimar la evaporación a través de los datos de evapotranspiración potencial, proporcionando valores de Kc a las áreas cubiertas por el agua y en las que se tienen asentamientos urbanos, haciendo la consideración de que en estos lugares no se tiene transpiración por parte de la vegetación (Anexo 24); cabe mencionar que estos valores de Kc han sido tomados del documento “Balance Hídrico Integrado y Dinámico en El Salvador” realizado por el MARN en el año 2005.

En la siguiente tabla se presentan los valores de evaporación obtenidos para cada mes del año

Tabla 5-10 Evaporación media sobre la cuenca de la Laguna El Jocotal.



5.2.3. Caudal subterráneo de entrada (Q_{ui})

Recarga acuífera subterránea.

Representa el valor de la infiltración que existe en la cuenca. Para esta investigación se determinó por medio del método de Recarga Acuífera Subterránea (método RAS).

5.2.3.1. Cálculo del método RAS.

Como ya se vio anteriormente en el capítulo 2, para el cálculo de la recarga acuífera subterránea es necesario disponer de la distribución del mapa de isoyetas y de isolíneas de evapotranspiración real en la cuenca.

Las isoyetas sobre la cuenca se determinaron con anterioridad en el apartado “Precipitación media sobre la cuenca”, dejándonos como incógnita para el cálculo únicamente las isolíneas de ETr. Estas se determinaron, multiplicando la ETp por un coeficiente Kc ponderado, estimado en base a todos los coeficientes que se determinaron para la cuenca y tomando como base para la ponderación el porcentaje del área total de la cuenca en la cual influyen, logrando así determinar un coeficiente Kc uniformizado para toda la cuenca en cada mes del año. Los resultados obtenidos de este procedimiento se resumen en el Anexo 25.

Realizando el álgebra de mapas entre las curvas isoyetas y las isolíneas de Etr obtenemos el Balance Climático (BC):

$$BC = P - Etr$$

Además con los coeficientes requeridos k_p , k_v y k_{fc} determinados para la cuenca en específico, obtenemos el coeficiente de infiltración (C)

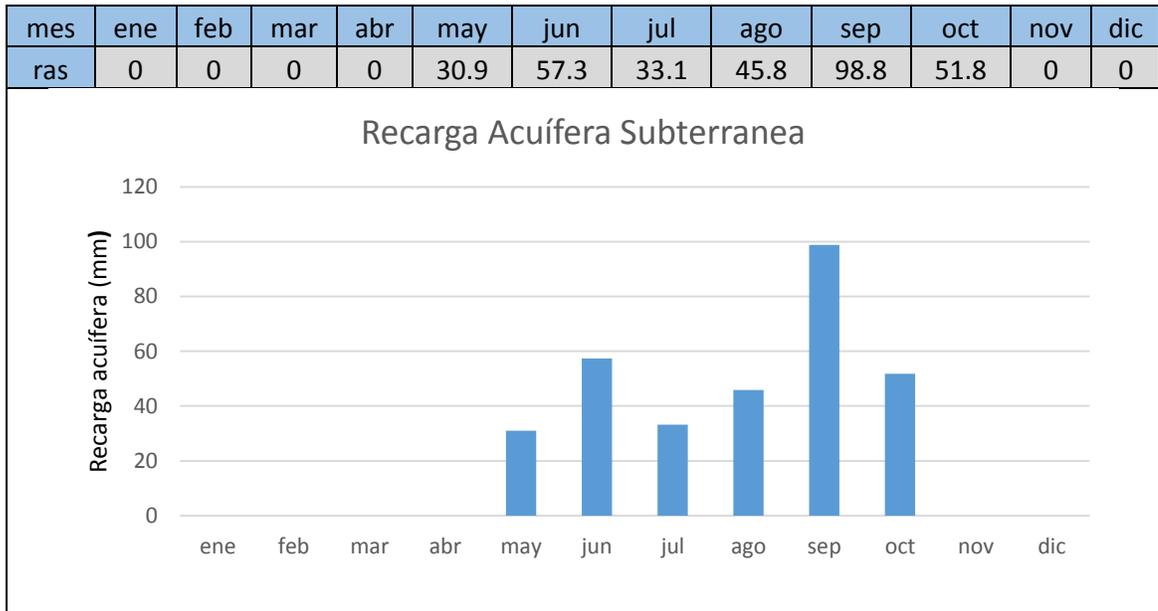
$$C = k_p + k_v + k_{fc}$$

Estos coeficientes se presentan en el Anexo 26.

De la información de estos mapas se obtiene el promedio ponderado para cada mes y se determina la recarga acuífera mensual promedio en la cuenca.

Los resultados son los siguientes:

Tabla 5-11 Recarga acuífera promedio mensual.



5.2.3.2. Manantiales subterráneos

Estos se consideran como una entrada al sistema hidrológico de la cuenca y se asumen como un caudal constante de $1.7855 \text{ m}^3/\text{s}$, este valor es el utilizado en el Modelo Hidrológico para simular los manantiales de la Laguna y fue calculado en el apartado 4.3.6.

5.2.4. Extracciones

La determinación de las extracciones se hizo en base a la suposición de que la población de los cantones aledaños a la laguna, se abastecen de la extracción de agua desde el acuífero.

Para establecer la demanda se utilizó la información de los censos de 1971, 1992 y 2007, ya que son los que se encuentran dentro del período de estudio.

Esta información se presenta a continuación:

Tabla 5-12 Población de los municipios ubicados dentro de la cuenca de la Laguna El Jocotal.

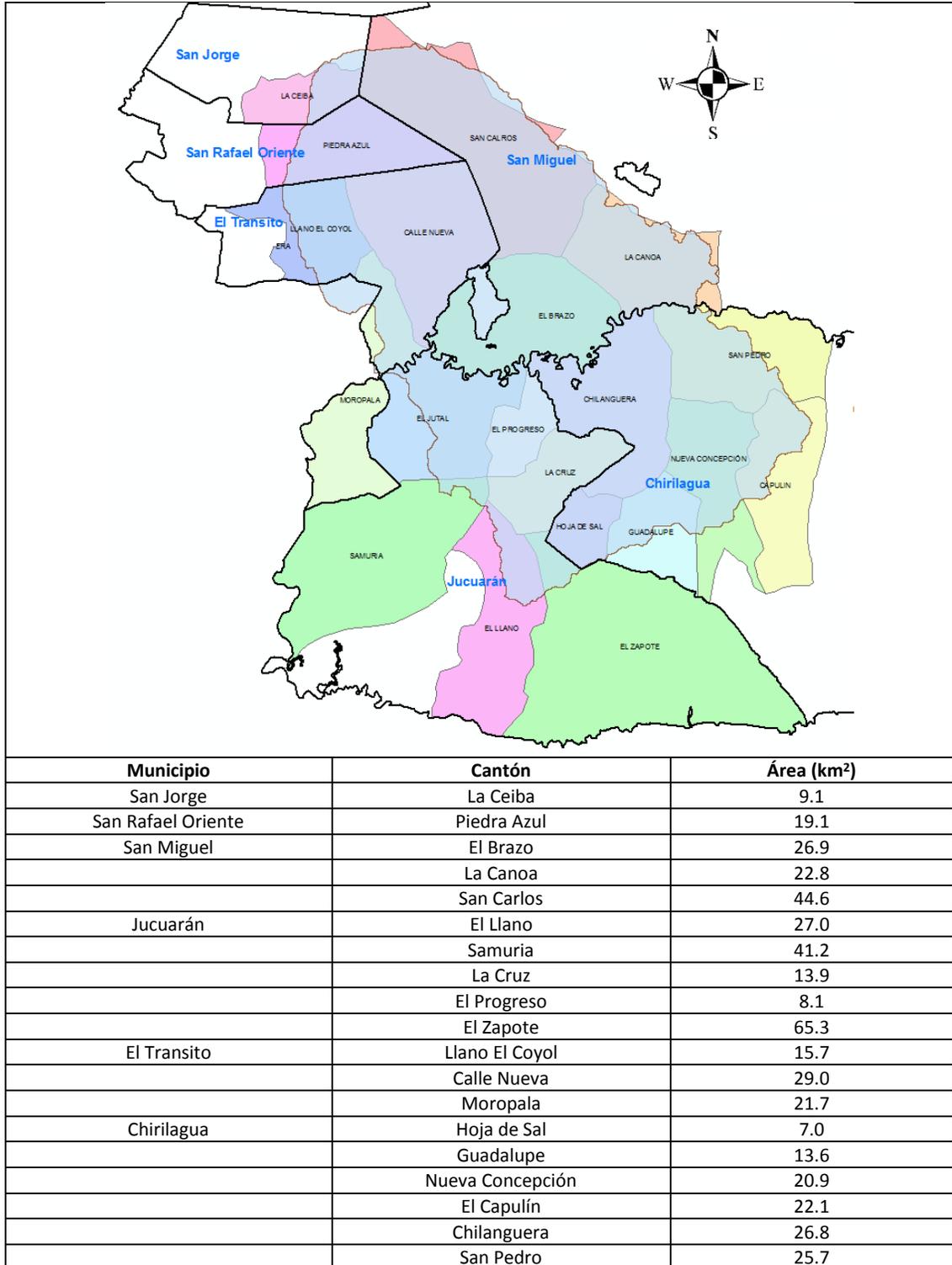
Año	Municipios	Área (km²)	población								
			Total			área					
						Urbana			Rural		
			total	hombres	mujeres	total	hombres	mujeres	total	hombres	mujeres
1971	11- Jucuarán	205.6	19,097	9,943	9,154	1,446	702	744	17,651	9,241	8,410
1971	08- El Tránsito	74.6	14,232	6,714	7,518	4,815	1,809	3,006	9,417	4,905	4,512
1971	07- Chirilagua	214.1	21,132	11,035	10,097	5,897	2,974	2,923	15,235	8,061	7,174
1971	01- San Miguel	602.8	120,640	58,310	62,330	61,940	28,508	33,432	58,700	29,802	28,898
1971	18- San Rafael	42.4	11,325	5,700	5,625	4,579	2,239	2,340	6,746	3,461	3,285
1971	16- San Jorge	36.7	8,899	4,512	4,387	3,754	1,870	1,884	5,145	2,642	2,503
1992	11- Jucuarán	205.6	11,196	5,717	5,479	1,429	706	723	9,767	5,011	4,756
1992	08- El Tránsito	74.6	16,455	8,090	8,365	7,506	3,629	3,877	8,949	4,461	4,488
1992	07- Chirilagua	214.1	21,721	10,832	10,889	5,059	2,385	2,674	16,662	8,447	8,215
1992	01- San Miguel	602.8	191,016	90,965	100,051	127,596	59,806	67,790	63,420	31,159	32,261
1992	18- San Rafael	42.4	15,110	7,371	7,739	7,384	3,486	3,898	7,726	3,885	3,841
1992	16- San Jorge	36.7	8,903	4,450	4,453	3,948	1,920	2,028	4,955	2,530	2,425
2007	11- Jucuarán	205.6	13,424	6,619	6,805	1,140	528	612	12,284	6,091	6,193
2007	08- El Tránsito	74.6	18,363	8,584	9,779	7,612	3,427	4,185	10,751	5,157	5,594
2007	07- Chirilagua	214.1	19,984	9,515	10,469	3,107	1,454	1,653	16,877	8,061	8,816
2007	01- San Miguel	602.8	218,410	99,672	118,738	158,136	71,132	87,004	60,274	28,540	31,734
2007	18- San Rafael	42.4	13,290	6,124	7,166	5,598	2,469	3,129	7,692	3,655	4,037
2007	16- San Jorge	36.7	9,115	4,287	4,828	2,598	1,154	1,444	6,517	3,133	3,384

Fuentes: (Centro Nacional de Registros) y (Registro Nacional de las Personas Naturales, 2007)

Con estos datos se determinó la densidad de población para cada uno de los municipios en los años evaluados y con este dato se estimó la población de cada uno de los cantones que se encuentran dentro de la cuenca de la laguna.

En la siguiente tabla se muestran estos cantones.

Tabla 5-13 Cantones de la cuenca de la Laguna El Jocotal.



Con el área total de los cantones que influyen dentro de la cuenca y la densidad de población, se obtiene un estimado de la población para la cual se determina la demanda del acuífero.

Tabla 5-14 Estimación de la población.

Año	Municipios	Área del municipio Km ²	Densidad de población (Hab/km ²)	Área total de cantones en la cuenca (km ²)	Población (hab)
1971	11- Jucuarán	205.6	93	155.5	14444
1971	08- El Tránsito	74.6	191	66.4	12664
1971	07- Chirilagua	214.1	99	116.2	11465
1971	01- San Miguel	602.8	200	94.2	18855
1971	18- San Rafael	42.4	267	19.1	5086
1971	16- San Jorge	36.7	243	9.1	2210
1992	11- Jucuarán	205.6	54	155.5	8468
1992	08- El Tránsito	74.6	221	66.4	14642
1992	07- Chirilagua	214.1	101	116.2	11785
1992	01- San Miguel	602.8	317	94.2	29854
1992	18- San Rafael	42.4	356	19.1	6786
1992	16- San Jorge	36.7	243	9.1	2211
2007	11- Jucuarán	205.6	65	155.5	10153
2007	08- El Tránsito	74.6	246	66.4	16340
2007	07- Chirilagua	214.1	93	116.2	10842
2007	01- San Miguel	602.8	362	94.2	34136
2007	18- San Rafael	42.4	313	19.1	5969
2007	16- San Jorge	36.7	249	9.1	2264

Tabla 5-15 Extracciones del acuífero.

Año	Municipios	Población (hab)	Dotación (l/hab/d)	Demanda (m ³ /día)	Demanda total (m ³ /día)
1971	11- Jucuarán	14444	200	2888.7	12944.9
1971	08- El Tránsito	12664	200	2532.9	
1971	07- Chirilagua	11465	200	2293.1	
1971	01- San Miguel	18855	200	3771.0	
1971	18- San Rafael	5086	200	1017.2	
1971	16- San Jorge	2210	200	442.0	
1992	11- Jucuarán	8468	200	1693.6	14749.3
1992	08- El Tránsito	14642	200	2928.5	
1992	07- Chirilagua	11785	200	2357.0	
1992	01- San Miguel	29854	200	5970.8	
1992	18- San Rafael	6786	200	1357.2	
1992	16- San Jorge	2211	200	442.2	
2007	11- Jucuarán	10153	200	2030.6	15940.7
2007	08- El Tránsito	16340	200	3268.1	
2007	07- Chirilagua	10842	200	2168.5	
2007	01- San Miguel	34136	200	6827.1	
2007	18- San Rafael	5969	200	1193.7	
2007	16- San Jorge	2264	200	452.8	

Finalmente se determina la demanda para cada mes del año y esta se expresa en millones de metros cúbicos (Mm³)

Tabla 5-16 Extracción mensual promedio en Mm³

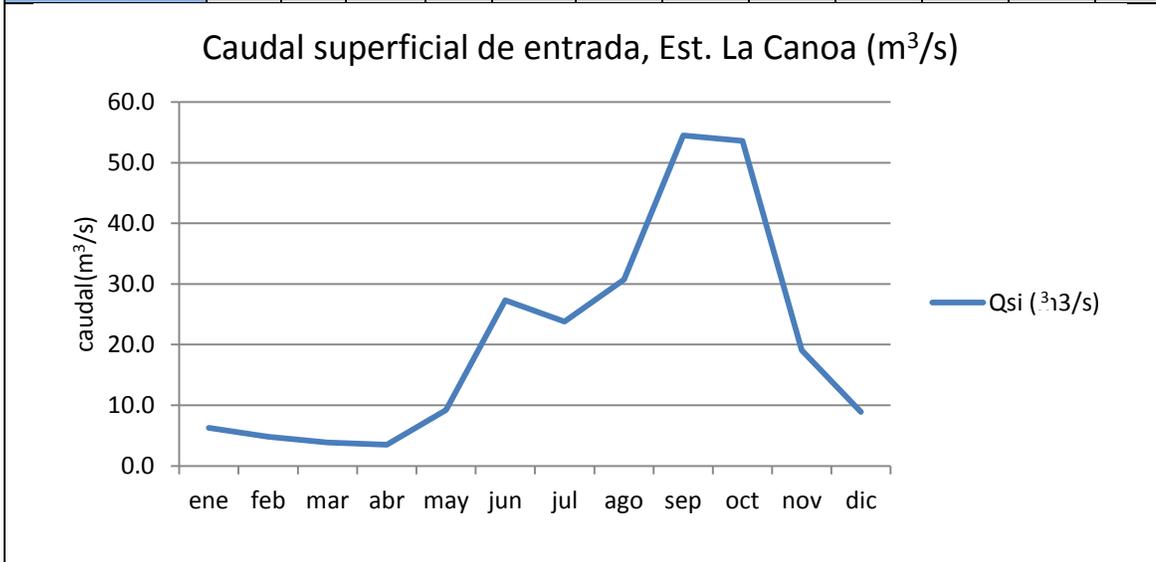
año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1971	0.40	0.36	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	4.72
1992	0.46	0.41	0.46	0.44	0.46	0.44	0.46	0.46	0.44	0.46	0.44	0.46	5.38
2007	0.49	0.45	0.49	0.48	0.49	0.48	0.49	0.49	0.48	0.49	0.48	0.49	5.82
promedio	0.45	0.41	0.45	0.44	0.45	0.44	0.45	0.45	0.44	0.45	0.44	0.45	5.31

5.2.5. Caudal superficial de entrada (Q_{si})

Como resultado de la modelación del Río Grande de San Miguel se determinó el aporte mensual de caudal hacia la cuenca de la Laguna El Jocotal en el punto de control La Canoa. Para efectos del estudio del balance hídrico se determinó el caudal promedio mensual de estos datos.

Tabla 5-17 Caudal superficial de entrada, estación La Canoa (m³/s)

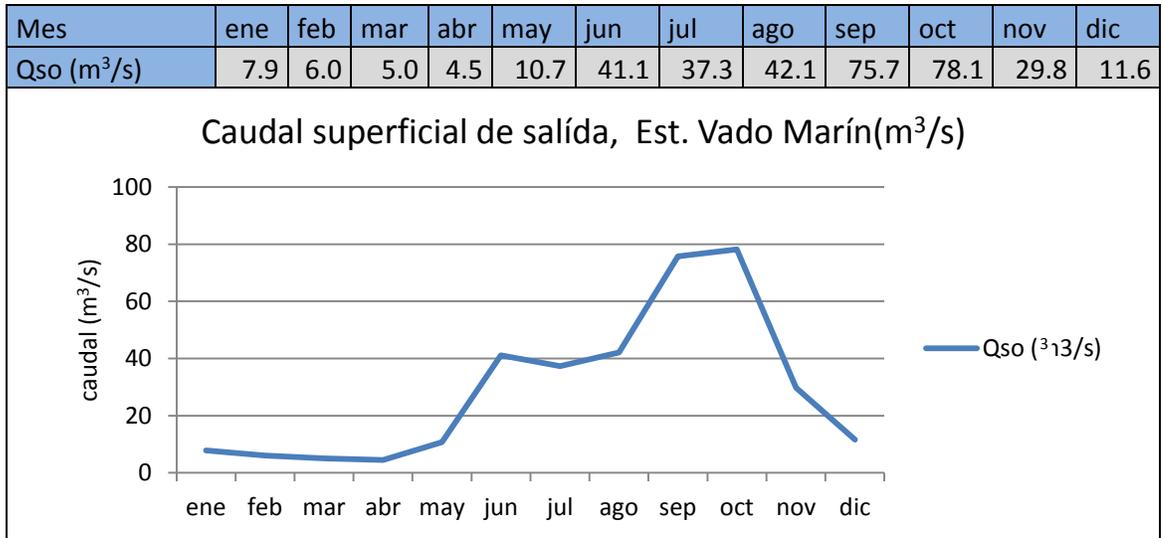
mes	ene	feb	mar	abr	may	Jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Qsi (m ³ /s)	6.3	4.8	3.9	3.5	9.2	27.3	23.8	30.7	54.5	53.6	19.1	8.9



5.2.6. Caudal superficial de salida (Q_{SO}).

Es el caudal superficial que sale de la cuenca a través del punto de control Vado Marín.

Tabla 5-18 Caudal superficial de salida, estación Vado Marín (m^3/s)



5.3. Cálculo del Balance Hídrico.

Los parámetros calculados anteriormente se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 5-19 Parámetros del Balance Hídrico.

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Evaporación(mm)	116.0	117.5	143.9	144.1	137.2	123.6	134.6	129.9	110.2	109.2	104.0	107.7
Extracciones (Mm^3)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Evapotranspiración real(mm)	0.6	0.5	2.9	29.6	134.5	138.3	152.2	149.1	119.1	126.8	114.6	4.0
Precipitación media (mm)	0.6	0.5	2.9	29.6	199.5	266.6	222.5	263.8	349.6	253.0	53.9	4.0
Recarga Acuífera Subterránea (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	30.9	57.3	33.1	45.8	98.8	51.8	0.0	0.0
Caudal superficial de entrada Est. La Canoa (m^3/s)	6.2	4.8	3.8	3.5	9.2	27.2	23.9	30.7	54.7	53.8	19.0	8.8
Caudal superficial de salida Est. V. Marín (m^3/s)	8.6	6.9	5.8	5.3	12.7	42.8	38.1	41.9	75.8	78.9	31.4	12.1
Caudal subterráneo de entrada, Manantiales (m^3/s)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8

Para poder ingresar los datos a la ecuación del balance hídrico es necesario que se encuentren en una misma unidad de medida, para ello se convierten de milímetros (mm) a millones de metros cúbicos (Mm³) multiplicando el dato por el área de la cuenca.

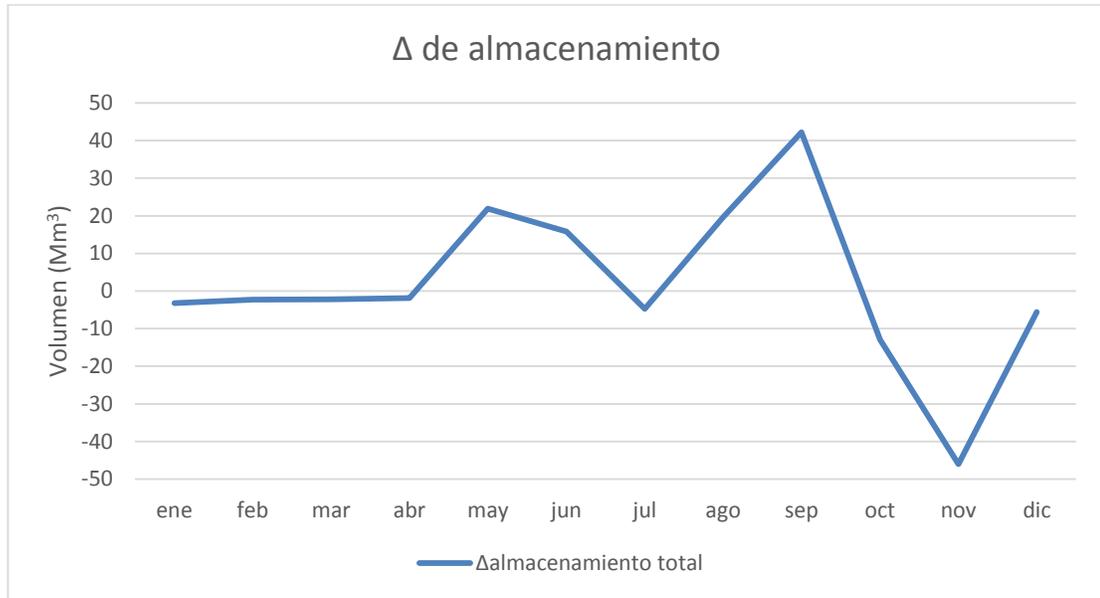
Se tomó en cuenta que el área del espejo de agua de la laguna varía para cada época del año ya que esto influye en el cálculo de la evaporación y evapotranspiración mensuales. A continuación se muestran los datos utilizados.

Tabla 5-20 Variación del área del espejo de agua de la laguna según la época del año.

Mes	Área Urbanizada (km ²)	Área de la laguna (km ²)	Área de Evaporación (km ²)	Área de la cuenca (km ²)	Área de Evapotranspiración (km ²)
Enero	4.56	5.02	9.58	289.53	284.51
Febrero	4.56	4.96	9.51	289.53	284.58
Marzo	4.56	4.89	9.45	289.53	284.64
Abril	4.56	4.89	9.45	289.53	284.64
Mayo	4.56	5.37	9.92	289.53	284.17
Junio	4.56	23.92	28.47	289.53	265.62
Julio	4.56	23.23	27.79	289.53	266.30
Agosto	4.56	23.33	27.89	289.53	266.20
Septiembre	4.56	25.99	30.55	289.53	263.54
Octubre	4.56	26.10	30.66	289.53	263.43
Noviembre	4.56	21.89	26.45	289.53	267.64
Diciembre	4.56	5.18	9.73	289.53	284.36

Tabla 5-21 Parámetros del Balance Hídrico en Mm³.

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
Evaporación.	1.1	1.1	1.4	1.4	1.4	3.5	3.7	3.6	3.4	3.3	2.8	1.0	27.7
Evapotranspiración real.	0.2	0.1	0.8	8.4	38.2	36.7	40.5	39.7	31.4	33.4	30.7	1.1	261.4
Precipitación media.	0.2	0.1	0.8	8.6	57.8	77.2	64.4	76.4	101.2	73.2	15.6	1.2	476.8
Recarga Acuífera Subterránea.	0.0	0.0	0.0	0.0	8.8	15.2	8.8	12.2	26.0	13.7	0.0	0.0	84.7
Caudal superficial de entrada Est. La Canoa.	16.6	11.6	10.3	9.0	24.7	70.5	63.9	82.2	141.9	144.0	49.1	23.5	647.4
Caudal superficial de salida Est. V. Marín.	23.1	16.7	15.4	13.8	34.1	111.0	102.0	112.1	196.4	211.4	81.5	32.3	949.9
Caudal subterráneo de entrada Nacimientos.	4.8	4.3	4.8	4.6	4.8	4.6	4.8	4.8	4.6	4.8	4.6	4.8	56.3
Extracciones.	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	5.3
Δ almacenamiento total	-3.2	-2.3	-2.2	-1.8	21.9	15.8	-4.7	19.7	42.2	-12.9	-46.0	-5.5	20.9



Gráfica 5-2 Variación del almacenamiento en el acuífero.

Como resultado obtenemos el Δ de almacenamiento total, que como se puede ver en la tabla anterior es, en promedio $20.9 \text{ Mm}^3/\text{año}$, si dividimos esta cantidad por el área de la cuenca, 289.53 km^2 obtenemos:

$$\frac{20.9 \text{ Mm}^3}{289.53 \text{ km}^2} = 0.072 \text{ m}$$

Lo que nos indica que en promedio el acuífero aumenta $0.072 \text{ m} \approx 7.2 \text{ cm}$ al año.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- 1- Con visitas de campo, entrevistas y el análisis de cuadrantes e imágenes satelitales, se determinó que la interacción entre la Laguna El Jocotal y el Río Grande de San Miguel cambió durante los últimos años de la década del 2000, debido a la formación de un nuevo cauce conocido como La Rotura, éste habría conectado ambos recursos hídricos de forma directa durante el período aproximado 2006-2010.
- 2- Del estudio de la hidrografía y batimetría de la Laguna El Jocotal se confirma lo siguiente:
 - Se presentó un azolve acelerado en la laguna durante el período 2006-2011, que coincide con el período de mayor influencia del cauce La Rotura; además, se estima que durante este lapso de tiempo, la profundidad se habría reducido unos 0.7 m, y el volumen de agua unos 2.9 Mm³.
 - La zona más afectada por el azolve es la franja sureste donde desemboca el cauce La Rotura, mientras que la menos afectada es la circundante a la Poza Azul; éstas presentan una profundidad efectiva promedio de 0.2 y 3.0 metros respectivamente.
 - A partir del azolve acelerado de la laguna se ha detectado un aumento en el ancho de los desagües actuales, tanto de los intermitentes como de los permanentes, principalmente en el secundario, donde el ancho ha incrementado desde unos 4 metros a principios del 2000 hasta 28 metros en el 2012.
- 3- De la comparación del análisis de caudales promedios diarios con la relación de niveles máximos La Canoa – Vado Marín y el monitoreo en tiempo real que se hizo de ésta, se concluyó que año con año, la Laguna El Jocotal, El Río Grande de San Miguel y las lagunas ubicadas al sur de éste, se unen en una sola planicie de inundación.
- 4- Al comparar las relaciones de caudales promedios diarios máximos entre La Canoa y Vado Marín para todo el registro utilizable, se establece que las condiciones de desborde y planicie del Río Grande de San Miguel hacia la Laguna El Jocotal, se mantienen desde la década de los 70's hasta la actualidad.

- 5- La relación de niveles máximos entre La Canoa y Vado Marín, indica que las avenidas del Río Grande de San Miguel son amortiguadas por la Laguna El Jocotal de la siguiente manera:
 - Si la laguna no ha formado una planicie con el río, ésta amortigua hasta un 60% el tirante de la crecida.
 - Si la laguna ha formado una planicie con el río, ésta amortigua hasta un 40% el tirante de la crecida.

- 6- La relación de tiempo de tránsito entre La Canoa y Vado Marín, indica que las avenidas del Río Grande de San Miguel son retrasadas por la Laguna El Jocotal de la siguiente manera, al atravesar este tramo del río:
 - a. Si la crecida no desborda, tarda entre 15 y 9 horas.
 - b. Si la crecida desborda luego de un período seco, tarda entre 35 y 27 horas.
 - c. Si la crecida desborda durante un período lluvioso, tarda entre 27 y 21 horas.

- 7- Observamos que la Laguna El Jocotal, ubicada entre las estaciones La Canoa y Vado Marín, se encuentra en una zona del RGSM tipificada como anastomasada, es decir, una zona de meandros pronunciados con numerosos brazos que se reintegran al cauce principal del río, formando grandes islas estables; por lo que es natural que estos brazos bajo circunstancias especiales, pueden llegar a conectarse con la Laguna El Jocotal, como en el caso del cauce La Rotura.

- 8- Además según el perfil del río, el tramo La Canoa – Vado Marín corresponde a una zona de baja pendiente, indicando que efectivamente en ésta las crecidas tienen la mayor pérdida de energía, explicando el comportamiento de extracción, ya no como una pérdida de caudal, sino como una atenuación del hidrograma.

- 9- En base a la modelación del escenario natural, todos los años se supera el nivel del muelle del caserío El Borbollón, lo que indica que siempre se presentan inundaciones cuyas zonas geográficas afectadas dependen de qué tan copiosa sea la época lluviosa.

- 10- También de la modelación del escenario natural se confirmó que los eventos meteorológicos que produjeron las mayores inundaciones en la Laguna El Jocotal, durante el período 1970 – 2012 fueron: Huracán Gregorio en 1988, Huracán Mitch en 1998, Tormenta Tropical Agatha en 2010 y Depresión Tropical 12E en 2011.

- 11- Según la comparación de los niveles modelados en los escenarios E1 y E2, el cauce “La Rotura” no representa un factor importante en la problemática de inundaciones cuando el Río Grande de San Miguel se encuentre desazolvado, pues en promedio la diferencia de los niveles sería de 4 centímetros a lo largo del año.
- 12- Los resultados obtenidos de los escenarios sin muros indican que aunque se disminuirían en promedio 1 metro los niveles alcanzados por la laguna durante las inundaciones, éstos descenderían hasta niveles críticos durante la época seca, reduciendo considerablemente el área del espejo de agua y disminuyendo la profundidad efectiva hasta alcanzar unos 10 centímetros.
- 13- El escenario E3 es el más desfavorable para la problemática de inundaciones, ya que al dirigir todo el caudal del Río Grande de San Miguel a través de la Laguna El Jocotal, esta incrementa sus niveles sobre la variación natural, un promedio de 0.30 metros durante todo el año, y hasta 0.5 metros para eventos meteorológicos fuertes. Por lo tanto, se concluye que el azolvamiento del Río Grande de San Miguel ha sido el causante de la problemática de inundaciones en la Laguna El Jocotal durante la última década.
- 14- Según el Balance Hídrico del acuífero de la cuenca de la Laguna El Jocotal, este incrementa su nivel a una tasa promedio de 7.2 centímetros por año.

6.2. Recomendaciones

- 1- Como una continuación a esta investigación podrían evaluarse hidráulicamente secciones del Río Grande de San Miguel en el tramo La Canoa – Vado Marín, que soporten un mayor caudal para que los desbordes sean menores y se disminuya la problemática de inundaciones. Este estudio debería incluir el impacto que se ocasionaría aguas abajo en la desembocadura del río.

- 2- No es posible proponer una solución a la problemática de azolvamiento de la Laguna El Jocotal únicamente con un estudio de tipo hidrológico, pues es necesario conocer la manera en que esta afecta al ecosistema para poder proponer una solución integral.

- 3- Para mejorar el modelo hidrológico del Río Grande de San Miguel se recomienda lo siguiente:
 - Realizar pruebas de campo que permitan obtener simulaciones más aproximadas a la realidad, pues el modelo desarrollado en esta investigación únicamente buscaba simular los caudales del río.
 - Realizar batimetría de la Laguna de Olomega.
 - Instalar limnómetro en Laguna de Olomega para conocer el régimen en que varían sus niveles actualmente.
 - Realizar aforos periódicamente en los desagües tanto de la Laguna de Olomega, como de la Laguna El Jocotal.

- 4- Es necesario que el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales realice un control de calidad a la información que registran sus estaciones hidrométricas a nivel general, que uniformicen los puntos de aforo en los ríos, que se realicen aforos periódicamente, que estos no solamente se hagan en época seca y que se actualicen las curvas de descarga de cada estación, pues realizar el control de calidad de esta información representó un retraso de 6 meses en la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Almorox, J. (s.f.). *Métodos y estimación de evapotranspiraciones ETp y ETr*.
- Castro, D. J. (2006). *Plan General de Transformación Zona Regable Andévalo Occidental Fronterizo (Huelva). Anejo 6*. Sevilla.
- Centro Nacional de Registros. (s.f.). *Monografías de El Salvador*.
- Convención RAMSAR. (1997). Ficha técnica Laguna El Jocotal.
- Diario Oficial. (1996). Tomo N°331, Decreto Legislativo N°689.
- Diario Oficial. (1998). Tomo N°341, Acuerdo Ejecutivo N°535 y Decreto Legislativo N°341.
- Eduardo A. Chávarri Velarde. (2004). *EVAPOTRANSPIRACIÓN*. Lima.
- Francisco Javier Aparicio Mijares. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico D.F.: Editorial Limusa.
- Francisco Javier Sánchez San Román. (s.f.). *HEC-HMS Manual elemental*. Salamanca, España.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (s.f.). *Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas*. IDEAM.
- Instituto Hidrológico Sueco. (2006). *Integrates Hydrological Modelling System Manual Version 5.10*.
- Jorge Antonio Castaneda Cerón. (2010). CALIBRACION DEL MODELO HYDROLOGISKA BYRÅNS VATTENBALANS EN LA CUENCA DEL RIO JIBOA COMO HERRAMIENTA PARA EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR INUNDACIONES. *REVISTA CIENTÍFICA*, 8.
- Martín Junker. (s.f.). *Método RAS para determinar la Recarga de Agua Subterránea*. San Salvador.
- OIRSA. (s.f.). Descripción de Lagunas de El Salvador. 22.
- Registro Nacional de las Personas Naturales. (2007). *Censo Nacional*. El Salvador.
- Sala de historia*. (s.f.). Obtenido de <http://www.saladehistoria.com/geo/Cont/C022.htm>

Servicio Nacional de Estudios Territoriales - Servicio Hidrológico Nacional. (2005). *BALANCE HÍDRICO INTEGRADO Y DINAMICO EN EL SALVADOR*. San Salvador.

UNESCO. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico - Guía internacional de investigación y métodos*. París.

Universidad de El Salvador. (2005). *ESTUDIO HÍDRO-AMBIENTAL DE LAS ZONAS DE RECARGA ACUÍFERA DE LA CIUDAD DE SAN MIGUEL*. San Miguel.

Ven Te Chow. (1964). *Handbook of Applied Hidrology*. McGraw - Hill.

World Meteorological Organization. (2008). *WMO-8 Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. WMO.

ANEXOS

8.1. Anexos del capítulo 3

Anexo 1 – Disponibilidad mensual de registros históricos de las estaciones hidrométricas del RGSM.

Año Hidrológico	1959-1960												1960-1961												1961-1962												
	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	
Villerías																																					
P. Moscoso																																					
El Delirio																																					
V. Marín																																					
Las Conchas																																					

Mes	1962-1963												1963-1964												1964-1965												
	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	
Villerías																																					
P. Moscoso																																					
El Delirio																																					
V. Marín																																					
Las Conchas																																					

Mes	1965-1966												1966-1967												1967-1968												
	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	
Villerías																																					
P. Moscoso																																					
El Delirio																																					
V. Marín																																					
Las Conchas																																					

Año Hidrológico	1968-1969												1969-1970												1970-1971											
Mes	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A
Villerías																																				
P. Moscoso																																				
El Delirio																																				
V. Marín																																				
Las Conchas																																				

Año Hidrológico	1971-1972												1972-1973												1973-1974											
Mes	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A
Villerías																																				
P. Moscoso																																				
La Canoa																																				
V. Marín																																				
Las Conchas																																				

Año Hidrológico	1974-1975												1975-1976												1976-1977											
Mes	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A
Villerías																																				
P. Moscoso																																				
La Canoa																																				
V. Marín																																				
Las Conchas																																				

Año Hidrológico	1977-1978												1978-1979												1979-1980											
Mes	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A
Villerías																																				
P. Moscoso																																				
La Canoa																																				
V. Marín																																				
Las Conchas																																				

Año Hidrológico	1980-1981											
Mes	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A
Villerías												
P. Moscoso												
La Canoa												
V. Marín												
Las Conchas												

Anexo 2 – Resultados del análisis de crecidas registradas por las estaciones Villerías y El Delirio durante el año 2006.

La tabla se divide en tres secciones: Villerías, El Delirio y Tiempo de tránsito entre ambas estaciones. Dentro de cada sección se muestra la fecha, hora y nivel en que inician las crecidas; la fecha hora y nivel en que alcanzan su nivel máximo; y el incremento de nivel que se tiene desde el inicio hasta el nivel máximo (ΔN). La última sección contiene la diferencia de tiempo que se tiene desde la hora del nivel máximo en Villerías, hasta la hora del nivel máximo en El Delirio.

Villerías							El Delirio							Tiempo de tránsito
Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	
Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		
05/12/2006	2:15	0,54	05/12/2006	11:30	0,82	0,28	05/12/2006	21:00	1,90	05/13/2006	5:00	2,10	0,20	17:30
05/13/2006	7:45	0,61	06/13/2006	9:30	0,91	0,30	05/13/2006	22:30	1,98	05/14/2006	3:15	2,13	0,15	17:45
05/16/2006	21:00	0,63	05/16/2006	23:00	0,83	0,20	05/17/2006	9:15	1,89	05/17/2006	17:30	2,05	0,16	18:30
05/19/2006	17:30	0,61	05/19/2006	19:00	1,09	0,48	05/20/2006	2:45	1,91	05/20/2006	10:30	2,21	0,30	15:30
05/19/2006	22:45	0,77	05/20/2006	0:15	1,07	0,30	05/20/2006	11:45	2,21	05/20/2006	15:00	2,28	0,07	14:45
05/20/2006	21:00	0,67	05/20/2006	22:15	0,89	0,22	05/21/2006	12:30	2,04	05/21/2006	18:45	2,14	0,10	20:30
05/21/2006	19:00	0,67	05/21/2006	21:45	3,32	2,65	05/22/2006	4:00	2,06	05/22/2006	6:45	3,51	1,45	9:00
05/25/2006	7:45	0,55	05/25/2006	9:30	0,71	0,16	05/25/2006	22:30	1,92	05/26/2006	4:00	2,03	0,11	18:30
05/30/2006	22:30	0,54	05/31/2006	1:15	0,63	0,09	05/31/2006	16:30	1,86	05/31/2006	23:30	1,95	0,09	22:15
06/01/2006	2:30	0,61	06/01/2006	3:30	1,32	0,71	06/01/2006	14:00	1,97	06/01/2006	18:00	2,39	0,42	14:30
06/02/2006	5:30	0,64	06/02/2006	7:00	1,00	0,36	06/02/2006	18:45	2,07	06/02/2006	22:00	2,24	0,17	15:00
06/05/2006	20:00	0,55	06/06/2006	0:15	0,64	0,09	06/06/2006	13:45	1,91	06/06/2006	19:30	1,97	0,06	19:15
06/06/2006	19:00	0,58	06/07/2006	0:00	0,70	0,12	06/07/2006	8:45	1,93	06/07/2006	16:30	2,03	0,10	16:30
06/07/2006	16:45	0,69	06/07/2006	21:15	1,15	0,46	06/08/2006	4:30	2,01	06/08/2006	9:45	2,46	0,45	12:30
06/08/2006	8:15	0,87	06/08/2006	9:30	0,93	0,06	06/08/2006	20:45	2,30	06/08/2006	22:45	2,32	0,02	13:15
06/08/2006	20:00	0,79	06/08/2006	21:30	0,92	0,13	06/09/2006	8:00	2,21	06/09/2006	11:30	2,26	0,05	14:00
06/10/2006	6:30	0,78	06/10/2006	12:45	2,39	1,61	06/10/2006	11:45	2,16	06/11/2006	0:00	3,98	1,82	11:15

Villeras							El Delirio							Tiempo de tránsito
Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	
Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		
06/10/2006	15:15	2,19	06/10/2006	19:00	3,01	0,82	06/11/2006	0:15	3,97	06/11/2006	2:30	4,15	0,18	7:30
06/11/2006	1:15	1,73	06/11/2006	5:45	2,84	1,11	06/11/2006	10:30	3,57	06/11/2006	13:45	3,92	0,35	8:00
06/11/2006	19:30	1,12	06/11/2006	20:30	2,29	1,17	06/12/2006	2:30	2,78	06/12/2006	6:45	3,19	0,41	10:15
06/12/2006	18:15	0,96	06/12/2006	19:45	3,51	2,55	06/13/2006	0:15	2,54	06/13/2006	4:30	3,87	1,33	8:45
06/13/2006	17:45	1,02	06/13/2006	20:45	1,95	0,93	06/14/2006	2:15	2,74	06/14/2006	5:45	3,05	0,31	9:00
06/14/2006	22:00	0,81	06/15/2006	2:00	4,73	3,92	06/15/2006	4:30	2,38	06/15/2006	10:45	4,88	2,50	8:45
06/15/2006	3:45	4,39	06/15/2006	5:15	4,57	0,18	06/15/2006	11:30	4,82	06/15/2006	14:15	4,98	0,16	9:00
06/15/2006	17:30	1,61	06/15/2006	21:00	2,62	1,01	06/16/2006	2:00	3,33	06/16/2006	5:15	3,63	0,30	8:15
06/19/2006	21:30	0,66	06/20/2006	0:00	0,88	0,22	06/20/2006	10:30	2,12	06/20/2006	13:30	2,22	0,10	13:30
06/21/2006	0:45	0,66	06/21/2006	5:00	0,93	0,27	06/21/2006	12:30	2,11	06/21/2006	17:15	2,27	0,16	12:15
06/22/2006	19:30	0,63	06/22/2006	20:45	1,28	0,65	06/23/2006	3:45	2,07	06/23/2006	12:30	2,56	0,49	15:45
06/23/2006	0:00	1,02	06/23/2006	1:15	1,34	0,32	06/23/2006	22:45	2,31	06/24/2006	23:45	2,35	0,04	22:30
06/23/2006	22:00	0,71	06/23/2006	23:30	2,38	1,67	06/24/2006	6:15	2,21	06/24/2006	9:45	3,03	0,82	10:15
06/24/2006	2:45	1,55	06/24/2006	5:15	2,15	0,60	06/24/2006	10:30	3,03	06/24/2006	14:00	3,21	0,18	8:45
06/24/2006	18:00	1,03	06/24/2006	21:45	3,06	2,03	06/25/2006	2:15	2,55	06/25/2006	6:45	3,69	1,14	9:00
06/27/2006	18:45	0,67	06/27/2006	21:30	1,63	0,96	06/28/2006	2:00	2,18	06/28/2006	8:30	2,84	0,66	11:00
07/06/2006	6:15	0,50	07/06/2006	8:15	0,61	0,11	07/06/2006	19:00	1,92	07/07/2006	0:30	2,05	0,13	16:15
07/06/2006	23:15	0,60	07/07/2006	0:45	2,04	1,44	07/07/2006	8:30	2,03	07/07/2006	12:00	2,87	0,84	11:15
07/07/2006	20:15	0,76	07/07/2006	23:15	2,24	1,48	07/08/2006	5:15	2,66	07/08/2006	9:15	3,22	0,56	10:00
07/08/2006	22:15	0,93	07/08/2006	23:45	1,94	1,01	07/09/2006	6:00	2,62	07/09/2006	9:45	3,06	0,44	10:00
07/09/2006	20:45	0,84	07/09/2006	22:00	1,42	0,58	07/10/2006	6:15	2,52	07/10/2006	9:00	2,68	0,16	11:00
07/10/2006	23:00	0,74	07/11/2006	0:15	1,82	1,08	07/11/2006	7:45	2,32	07/11/2006	11:30	2,84	0,52	11:15
07/15/2006	21:00	0,53	07/16/2006	1:45	0,74	0,21	07/16/2006	12:45	2,01	07/16/2006	17:30	2,16	0,15	15:45

Villerías							El Delirio							Tiempo de tránsito
Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	
Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		
07/19/2006	6:30	0,76	07/19/2006	7:30	2,60	1,84	07/19/2006	14:00	2,34	07/19/2006	17:45	3,22	0,88	10:15
07/19/2006	19:00	0,97	07/20/2006	0:30	5,51	4,54	07/19/2006	22:45	2,96	07/20/2006	8:45	4,89	1,93	8:15
07/27/2006	3:30	0,64	07/27/2006	6:30	1,03	0,39	07/27/2006	15:45	2,06	07/27/2006	20:00	2,40	0,34	13:30
07/28/2006	23:15	0,63	07/29/2006	1:45	1,17	0,54	07/29/2006	11:15	2,05	07/29/2006	14:45	2,39	0,34	13:00
07/30/2006	22:15	0,72	07/31/2006	3:30	2,57	1,85	07/31/2006	3:45	2,20	07/31/2006	12:30	3,50	1,30	9:00
08/02/2006	1:00	0,74	08/02/2004	4:30	1,33	0,59	08/02/2006	11:45	2,34	08/02/2006	15:15	2,60	0,26	10:45
08/04/2006	0:15	0,67	08/04/2006	4:30	1,38	0,71	08/04/2006	11:30	2,82	08/04/2006	14:15	2,83	0,01	9:45
08/14/2006	2:30	0,54	08/14/2006	8:00	0,71	0,17	08/14/2006	17:30	2,04	08/14/2006	22:45	2,15	0,11	14:45
08/19/2006	2:15	0,53	08/19/2006	3:45	1,25	0,72	08/19/2006	12:00	2,56	08/19/2006	16:00	2,64	0,08	12:15
08/19/2006	21:15	0,67	08/19/2006	22:30	2,89	2,22	08/20/2006	4:45	2,27	08/20/2006	8:00	3,26	0,99	9:30
08/20/2006	17:30	0,79	08/20/2006	21:15	1,05	0,26	08/21/2006	4:15	2,38	08/21/2006	10:00	2,43	0,05	12:45
08/24/2006	21:45	0,51	08/24/2006	23:15	0,68	0,17	08/25/2006	12:15	2,00	08/25/2006	16:00	2,09	0,09	16:45
08/30/2006	2:00	0,53	08/30/2006	3:15	1,10	0,57	08/30/2006	8:15	2,00	08/30/2006	17:00	2,52	0,52	13:45
08/31/2006	20:15	0,63	08/31/2006	22:15	1,75	1,12	09/01/2006	5:45	2,09	09/01/2006	9:15	2,82	0,73	11:00
09/01/2006	21:00	0,67	09/02/2006	0:30	3,68	3,01	09/02/2006	2:30	2,31	09/02/2006	9:30	4,14	1,83	9:00
09/04/2006	22:15	0,60	09/05/2006	1:00	1,41	0,81	09/05/2006	3:00	2,16	09/05/2006	10:15	2,93	0,77	9:15
09/07/2006	1:30	0,58	09/07/2006	3:15	0,91	0,33	09/07/2006	13:15	2,14	09/07/2006	17:15	2,33	0,19	14:00
09/07/2006	23:45	0,65	09/08/2006	1:45	1,70	1,05	09/08/2006	3:00	2,30	09/08/2006	12:15	3,01	0,71	10:30
09/08/2006	23:30	0,70	09/09/2006	2:15	5,07	4,37	09/09/2006	6:30	2,33	09/09/2006	10:45	4,51	2,18	8:30
09/09/2006	19:30	1,15	09/10/2006	3:30	5,88	4,73	09/10/2006	2:30	2,73	09/10/2006	12:15	4,99	2,26	8:45
09/10/2006	23:45	1,35	09/11/2006	1:00	2,44	1,09	09/11/2006	6:00	2,61	09/11/2006	10:45	3,15	0,54	9:45
09/12/2006	21:15	1,01	09/12/2006	22:15	2,31	1,30	09/13/2006	0:45	2,21	09/13/2006	7:45	2,77	0,56	9:30
09/16/2006	16:00	0,76	09/16/2006	22:15	2,20	1,44	09/17/2006	0:15	1,98	09/17/2006	7:30	3,10	1,12	9:15

Villerías							El Delirio							Tiempo de tránsito
Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	
Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		
09/17/2006	21:45	0,89	09/18/2006	1:00	1,91	1,02	09/18/2006	6:30	2,13	09/18/2006	11:30	2,77	0,64	10:30
09/19/2006	20:00	1,06	09/20/2006	0:15	5,07	4,01	09/20/2006	1:00	2,43	09/20/2006	8:00	4,51	2,08	7:45
09/20/2006	21:15	1,20	09/21/2006	1:00	3,99	2,79	09/21/2006	3:15	2,52	09/21/2006	8:45	4,36	1,84	7:45
09/21/2006	20:00	1,12	09/22/2006	1:00	2,53	1,41	09/22/2006	0:45	2,58	09/22/2006	9:30	4,22	1,64	8:30
09/25/2006	22:15	0,86	09/25/2006	23:45	1,37	0,51	09/26/2006	2:30	2,02	09/26/2006	8:00	2,41	0,39	8:15
09/27/2006	3:30	0,73	09/27/2006	4:30	0,97	0,24	09/27/2006	13:45	1,96	09/27/2006	17:30	2,07	0,11	13:00
09/29/2006	19:45	0,70	09/29/2006	23:45	1,93	1,23	09/30/2006	3:15	1,89	09/30/2006	9:15	2,67	0,78	9:30
10/01/2006	0:30	0,76	10/01/2006	2:15	2,44	1,68	10/01/2006	8:15	2,23	10/01/2006	11:45	2,83	0,60	9:30
10/07/2006	0:45	0,64	10/07/2006	4:45	1,45	0,81	10/07/2006	12:30	1,92	10/07/2006	15:30	2,34	0,42	10:45
10/08/2006	22:00	0,79	10/09/2006	0:45	2,28	1,49	10/09/2006	7:00	1,96	10/09/2006	11:00	2,82	0,86	10:15
10/09/2006	23:00	0,78	10/10/2006	0:45	1,20	0,42	10/10/2006	4:30	2,11	10/10/2006	11:00	2,37	0,26	10:15
10/10/2006	20:30	0,75	10/10/2006	4:00	1,80	1,05	10/11/2006	7:45	2,00	10/11/2006	15:00	2,52	0,52	11:00
10/15/2006	7:00	0,66	10/15/2006	11:15	0,91	0,25	10/15/2006	18:15	1,89	10/15/2006	23:15	2,04	0,15	12:00
10/18/2006	23:00	0,62	10/19/2006	2:15	1,27	0,65	10/19/2006	10:30	1,86	10/19/2006	14:00	2,21	0,35	11:45
10/20/2006	1:30	0,71	10/20/2006	7:00	4,90	4,19	10/20/2006	8:45	2,13	10/20/2006	14:45	4,55	2,42	7:45
10/21/2006	21:00	0,93	10/22/2006	5:45	3,20	2,27	10/22/2006	2:15	2,29	10/22/2006	14:00	4,33	2,04	8:15
10/23/2006	18:45	1,11	10/23/2006	20:00	1,75	0,64	10/24/2006	1:45	2,48	10/24/2006	6:30	2,74	0,26	10:30
10/24/2006	21:15	1,04	10/25/2006	1:15	3,69	2,65	10/25/2006	3:30	2,48	10/25/2006	10:00	4,13	1,65	8:45
10/25/2006	21:15	1,12	10/25/2006	22:30	1,89	0,77	10/26/2006	4:30	2,62	10/26/2006	9:00	2,98	0,36	10:30
10/31/2006	18:45	0,70	10/31/2006	21:00	0,99	0,29	11/01/2006	6:15	2,09	11/01/2006	9:00	2,19	0,10	12:00
11/01/2006	21:00	0,75	11/01/2006	22:30	1,23	0,48	11/02/2006	5:15	2,09	11/02/2006	11:15	2,30	0,21	12:45
11/02/2006	19:30	0,87	11/02/2006	21:00	2,39	1,52	11/03/2006	2:45	2,28	11/03/2006	6:45	2,94	0,66	9:45
11/07/2006	19:45	0,65	11/07/2006	21:00	1,69	1,04	11/08/2006	4:45	1,93	11/08/2006	8:45	2,41	0,48	11:45

Anexo 3 – Resultados del análisis de crecidas registradas por las estaciones Villerías y La Canoa durante el año 2012.

La tabla se divide en tres secciones: Villerías, La Canoa y Tiempo de tránsito entre ambas estaciones. Dentro de cada sección se muestra la fecha, hora y nivel en que inician las crecidas; la fecha hora y nivel en que alcanzan su nivel máximo; y el incremento de nivel que se tiene desde el inicio hasta el nivel máximo. La última sección contiene la diferencia de tiempo que se tiene desde la hora del nivel máximo en Villerías, hasta la hora del nivel máximo en La Canoa.

Villerías							La Canoa							Tiempo de tránsito
Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	
Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		
04/08/2012	4:45	0,15	04/08/2012	6:15	0,50	0,35	04/08/2012	21:30	1,01	04/09/2012	1:30	1,43	0,42	19:15
04/13/2012	2:15	0,15	04/13/2012	4:15	0,28	0,13	04/13/2012	18:15	1,08	04/14/2012	0:00	1,29	0,21	19:45
04/13/2012	10:45	0,26	04/13/2012	14:00	0,51	0,25	04/14/2012	2:15	1,30	04/14/2012	7:30	1,63	0,33	17:30
04/16/2012	7:00	0,25	04/16/2012	8:45	1,34	1,09	04/16/2012	15:15	1,20	04/16/2012	20:00	3,25	2,05	11:15
04/17/2012	23:00	0,25	04/18/2012	3:15	2,45	2,20	04/18/2012	6:30	1,44	04/18/2012	10:30	4,49	3,05	7:15
04/19/2012	0:00	0,46	04/19/2012	2:30	1,23	0,77	04/19/2012	4:15	2,22	04/19/2012	11:00	3,51	1,29	8:30
04/22/2012	2:15	0,31	04/22/2012	3:30	0,61	0,30	04/22/2012	13:30	1,34	04/22/2012	18:45	1,96	0,62	15:15
05/04/2012	18:45	0,16	05/04/2012	23:45	0,42	0,26	05/05/2012	4:30	1,13	05/05/2012	11:30	1,67	0,54	11:45
05/05/2012	1:15	0,34	05/05/2012	6:30	0,93	0,59	05/05/2012	12:00	1,67	05/05/2012	17:30	2,81	1,14	11:00
05/06/2012	5:30	0,35	05/06/2012	10:00	2,87	2,52	05/06/2012	14:00	1,64	05/06/2012	16:45	4,53	2,89	6:45
05/15/2012	1:15	0,19	05/15/2012	3:15	0,25	0,06	05/15/2012	17:00	1,15	05/15/2012	23:15	1,25	0,10	20:00
05/16/2012	6:45	0,21	05/16/2012	15:00	0,31	0,10	05/16/2012	22:30	1,23	05/17/2012	5:45	1,39	0,16	14:45
05/17/2012	19:00	0,22	05/18/2012	0:00	0,69	0,47	05/18/2012	8:00	1,28	05/18/2012	13:00	2,07	0,79	13:00
05/18/2012	23:30	0,36	05/19/2012	5:00	0,90	0,54	05/19/2012	3:45	1,79	05/19/2012	14:00	3,17	1,38	9:00

Villerías							La Canoa							Tiempo de tránsito
Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	
Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		
05/21/2012	17:30	0,29	05/21/2012	18:30	1,88	1,59	05/22/2012	0:15	1,75	05/22/2012	4:00	3,69	1,94	9:30
05/22/2012	21:15	0,38	05/22/2012	22:00	0,98	0,60	05/23/2012	5:45	1,78	05/23/2012	10:00	2,56	0,78	12:00
05/23/2012	23:15	0,35	05/24/2012	0:15	0,64	0,29	05/24/2012	9:30	1,62	05/24/2012	14:15	2,14	0,52	14:00
05/25/2012	1:45	0,34	05/25/2012	2:45	0,53	0,19	05/25/2012	13:00	1,53	05/25/2012	17:30	1,77	0,24	14:45
05/25/2012	14:15	0,37	05/25/2012	18:30	1,20	0,83	05/25/2012	23:15	1,65	05/26/2012	4:15	3,22	1,57	9:45
05/26/2012	22:15	0,36	05/27/2012	3:00	0,87	0,51	05/27/2012	8:45	1,61	05/27/2012	14:30	2,60	0,99	11:30
05/31/2012	20:30	0,22	06/01/2012	3:30	1,07	0,85	06/01/2012	7:30	1,29	06/01/2012	14:15	3,03	1,74	10:45
06/03/2012	22:00	0,28	06/03/2012	23:30	0,78	0,50	06/04/2012	6:00	1,34	06/04/2012	12:15	2,17	0,83	12:45
06/05/2012	2:45	0,31	06/05/2012	6:00	0,56	0,25	06/05/2012	8:15	1,47	06/05/2012	18:45	1,87	0,40	12:45
06/06/2012	1:15	0,35	06/06/2012	5:15	0,66	0,31	06/06/2012	14:30	2,13	06/06/2012	16:15	2,17	0,04	11:00
06/09/2012	20:00	0,29	06/06/2012	21:30	1,14	0,85	06/10/2012	2:00	1,23	06/10/2012	8:45	2,85	1,62	11:15
06/10/2012	20:30	0,37	06/10/2012	21:30	0,69	0,32	06/11/2012	7:00	1,56	06/11/2012	11:30	2,09	0,53	14:00
06/16/2012	21:45	0,28	06/17/2012	4:45	0,97	0,69	06/17/2012	10:00	1,27	06/17/2012	16:00	2,47	1,20	11:15
06/19/2012	19:00	0,44	06/19/2012	20:45	0,93	0,49	06/20/2012	4:30	1,65	06/20/2012	8:30	2,39	0,74	11:45
06/21/2012	19:00	0,34	06/21/2012	19:30	0,60	0,26	06/22/2012	11:00	1,29	06/22/2012	15:30	1,50	0,21	20:00
06/23/2012	0:45	0,34	06/23/2012	2:15	0,62	0,28	06/23/2012	13:15	1,34	06/23/2012	18:45	1,76	0,42	16:30
06/23/2012	18:45	0,40	06/23/2012	20:30	0,96	0,56	06/24/2012	4:30	1,59	06/24/2012	9:30	2,45	0,86	13:00
07/03/2012	1:45	0,31	07/03/2012	3:15	0,57	0,26	07/03/2012	15:15	1,12	07/03/2012	20:45	1,44	0,32	17:30
07/04/2012	18:15	0,30	07/04/2012	21:00	0,83	0,53	07/05/2012	5:45	1,15	07/05/2012	10:00	2,06	0,91	13:00
07/10/2012	19:30	0,17	07/10/2012	21:45	0,70	0,53	07/11/2012	8:15	1,07	07/11/2012	12:00	1,50	0,43	14:15
07/19/2012	1:45	0,18	07/19/2012	3:15	0,25	0,07	07/19/2012	18:45	1,03	07/19/2012	23:15	1,11	0,08	20:00
07/23/2012	4:30	0,15	07/23/2012	12:00	0,22	0,07	07/23/2012	23:45	0,99	07/24/2012	7:45	1,07	0,08	19:45

Villerías							La Canoa							Tiempo de tránsito
Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	
Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		
08/01/2012	4:15	0,14	08/01/2012	5:45	0,31	0,17	08/01/2012	21:30	0,94	08/02/2012	2:00	1,15	0,21	20:15
08/02/2012	4:45	0,22	08/02/2012	9:15	0,47	0,25	08/02/2012	20:15	1,11	08/03/2012	1:30	1,50	0,39	16:15
08/02/2012	22:00	0,30	08/03/2012	1:45	0,95	0,65	08/03/2012	9:45	1,34	08/03/2012	13:45	2,31	0,97	12:00
08/04/2012	1:15	0,28	08/04/2012	3:30	0,46	0,18	08/04/2012	14:30	1,40	08/04/2012	18:30	1,53	0,13	15:00
08/07/2012	19:30	0,23	08/07/2012	22:00	1,63	1,40	08/08/2012	5:30	1,04	08/08/2012	8:45	3,23	2,19	10:45
08/09/2012	23:15	0,42	08/10/2012	3:30	1,97	1,55	08/10/2012	3:00	1,37	08/10/2012	12:00	4,10	2,73	8:30
08/10/2012	15:45	0,64	08/10/2012	16:30	0,91	0,27	08/11/2012	0:00	2,40	08/11/2012	3:00	2,64	0,24	10:30
08/11/2012	14:15	0,48	08/11/2012	19:15	0,83	0,35	08/11/2012	21:45	1,75	08/12/2012	6:00	2,55	0,80	10:45
08/13/2012	0:30	0,45	08/13/2012	2:45	0,84	0,39	08/13/2012	10:15	1,68	08/13/2012	14:15	2,31	0,63	11:30
08/15/2012	4:00	0,36	08/15/2012	5:45	0,83	0,47	08/15/2012	14:00	2,00	08/15/2012	17:30	2,50	0,50	11:45
08/15/2012	20:00	0,37	08/15/2012	21:00	0,93	0,56	08/16/2012	3:00	1,89	08/16/2012	8:15	2,62	0,73	11:15
08/17/2012	23:30	0,31	08/18/2012	0:45	0,67	0,36	08/18/2012	9:45	1,52	08/18/2012	14:30	2,15	0,63	13:45
08/19/2012	0:30	0,40	08/19/2012	1:45	1,30	0,90	08/19/2012	8:00	1,97	08/19/2012	12:15	3,21	1,24	10:30
08/21/2012	21:30	0,29	08/22/2012	2:15	0,81	0,52	08/22/2012	9:30	1,38	08/22/2012	14:30	2,42	1,04	12:15
08/24/2012	2:30	0,30	08/24/2012	4:45	1,53	1,23	08/24/2012	10:45	1,35	08/24/2012	14:45	3,57	2,22	10:00
08/24/2012	21:15	0,46	08/24/2012	22:30	0,89	0,43	08/25/2012	5:15	1,95	08/25/2012	9:30	2,42	0,47	11:00
08/25/2012	2:30	0,54	08/25/2012	4:15	0,78	0,24	08/25/2012	11:30	2,41	08/25/2012	14:45	2,59	0,18	10:30
08/25/2012	21:00	0,41	08/25/2012	22:15	0,97	0,56	08/26/2012	4:30	1,76	08/26/2012	9:00	2,72	0,96	10:45
08/26/2012	19:15	0,41	08/26/2012	20:45	1,40	0,99	08/26/2012	0:45	1,75	08/26/2012	5:15	3,76	2,01	8:30
08/28/2012	23:45	0,40	08/28/2012	1:00	0,76	0,36	08/29/2012	9:00	1,45	08/29/2012	13:45	2,15	0,70	12:45
08/29/2012	21:45	0,40	08/29/2012	23:15	0,75	0,35	08/30/2012	7:45	1,93	08/30/2012	11:45	2,25	0,32	12:30
08/30/2012	17:30	0,43	08/30/2012	22:15	1,64	1,21	08/30/2012	23:30	1,81	08/31/2012	6:00	4,16	2,35	7:45

Villerías							La Canoa							Tiempo de tránsito
Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	
Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		
08/31/2012	21:15	0,54	09/01/2012	0:45	1,57	1,03	09/01/2012	2:45	2,18	09/01/2012	9:15	3,99	1,81	8:30
09/01/2012	22:00	0,53	09/02/2012	2:00	2,30	1,77	09/02/2012	5:00	2,01	09/02/2012	9:15	4,48	2,47	7:15
09/04/2012	17:00	0,44	09/04/2012	21:30	1,05	0,61	09/05/2012	2:30	1,63	09/05/2012	7:00	2,83	1,20	9:30
09/05/2012	20:15	0,49	09/05/2012	21:30	1,80	1,31	09/06/2012	2:00	1,82	09/06/2012	6:00	4,21	2,39	8:30
09/06/2012	21:30	0,48	09/06/2012	22:45	1,72	1,24	09/07/2012	00:45	2,19	09/07/2012	5:45	4,31	2,12	7:00
09/07/2012	17:45	0,78	09/07/2012	20:45	3,12	2,34	09/08/2012	1:00	2,60	09/08/2012	4:30	4,94	2,34	7:45
09/08/2012	19:45	0,75	09/08/2012	21:00	1,99	1,24	09/09/2012	1:00	3,13	09/09/2012	5:15	4,22	1,09	8:15
09/10/2012	1:45	0,63	09/10/2012	4:45	1,28	0,65	09/10/2012	8:30	2,47	09/10/2012	13:45	3,61	1,14	9:00
09/11/2012	00:00	0,95	09/11/2012	1:15	1,50	0,55	09/11/2012	6:15	3,64	09/11/2012	8:30	3,80	0,16	7:15
09/17/2012	05:15	0,34	09/17/2012	06:00	0,88	0,54	09/17/2012	14:30	1,70	09/17/2012	18:15	2,15	0,45	12:15
09/18/2012	03:00	0,46	09/18/2012	04:30	1,00	0,54	09/18/2012	13:00	1,96	09/18/2012	15:15	2,25	0,29	10:45
09/22/2012	19:00	0,45	09/22/2012	21:30	3,44	2,99	09/23/2012	01:30	1,48	09/23/2012	05:00	5,19	3,71	07:30

Anexo 4 – Resultados del análisis de crecidas registradas por las estaciones El Delirio y Vado Marín durante el año 2006.

La tabla se divide en tres secciones: El Delirio, Vado Marín y Tiempo de tránsito entre ambas estaciones. Para este análisis se notó que las crecidas de El Delirio son levemente reflejadas en Vado Marín, ya que los incrementos que se dan son de unas decenas de centímetros; y que su tiempo de tránsito varía desde 9 hasta más de 30 horas para distintos niveles máximos. Además, se tuvieron varias crecidas en El Delirio que no causaron ningún efecto apreciable a simple vista en Vado Marín, en estos casos, no se pudo establecer la fecha, hora y nivel ni del inicio de la crecida; ni la fecha, hora y nivel de su nivel máximo. Esto usualmente sucedió cuando Vado Marín mantenía nivel alto y las crecidas se caracterizaban por no ser muy grandes.

Por lo anterior, para poder determinar bajo qué condiciones específicas se daba este comportamiento, se incluyó a la sección de Vado Marín el análisis de Nivel y Tendencia del río “→” (descendente “D”, constante “C” o ascendente “A”) al momento en que se da el nivel máximo de la repunta en El Delirio.

El Delirio							Vado Marín										Tiempo de tránsito
Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	N(Del)max		Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN		
Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		Nivel	→	Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel			
06/23/2006	5:45	2,11	06/23/2006	12:30	2,56	0,45	1,26	C	06/23/2006	14:30	1,26	06/23/2006	22:45	1,36	0,10	10:15	
06/24/2006	6:00	2,20	06/24/2006	9:45	3,03	0,83	1,30	D	06/24/2006	13:30	1,29	06/24/2006	20:45	1,39	0,10	11:00	
06/25/2006	2:15	2,55	06/25/2006	6:45	3,69	1,14	1,39	C	06/25/2006	9:30	1,39	06/26/2006	6:15	1,52	0,13	23:30	
06/28/2006	2:00	2,18	06/28/2006	8:30	2,84	0,66	1,33	C	06/28/2006	10:30	1,33	06/28/2006	17:45	1,45	0,12	9:15	
07/07/2006	8:30	2,03	07/07/2006	12:00	2,87	0,84	1,08	C	07/07/2006	16:30	1,09	07/08/2006	0:45	1,42	0,33	12:45	
07/07/2006	17:00	2,62	07/07/2006	18:00	2,85	0,23	1,21	A	x	x	x				-	-	
07/07/2006	23:00	2,50	07/08/2006	2:30	2,73	0,23	1,42	A	x	x	x				-	-	
07/08/2006	5:15	2,66	07/08/2006	9:15	3,22	0,56	1,45	C	07/08/2006	16:30	1,45	07/08/2006	21:45	1,57	0,12	12:30	

El Delirio							Vado Marín										Tiempo de tránsito
Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	N(Del)max		Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN		
Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		Nivel	→	Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel			
07/08/2006	23:00	2,54	07/09/2006	2:00	2,76	0,22	1,55	C	x	x	x				-	-	
07/09/2006	6:00	2,62	07/09/2006	9:45	3,06	0,44	1,57	C	x	x	x				-	-	
07/10/2006	6:15	2,52	07/10/2006	9:00	2,68	0,16	1,59	C	x	x	x				-	-	
07/11/2006	7:45	2,32	07/11/2006	11:30	2,84	0,52	1,46	D	07/11/2006	15:30	1,45	07/11/2006	20:45	1,51	0,06	9:15	
07/16/2006	12:45	2,01	07/16/2006	17:30	2,16	0,15	1,08	C	07/16/2006	22:15	1,08	07/17/2006	4:45	1,13	0,05	11:15	
07/19/2006	10:00	2,13	07/19/2006	17:45	3,22	1,09	1,22	C	07/19/2006	20:30	1,23	07/20/2006	8:45	1,44	0,21	15:00	
07/19/2006	22:45	2,96	07/20/2006	8:45	4,89	1,93	1,44	A	07/20/2006	16:30	1,44	07/21/2006	12:00	1,81	0,37	27:15	
07/27/2006	15:45	2,06	07/27/2006	20:00	2,40	0,34	1,16	D	07/28/2006	1:30	1,15	07/28/2006	6:45	1,22	0,07	10:45	
07/29/2006	11:15	2,05	07/29/2006	14:45	2,39	0,34	1,11	C	07/29/2006	19:30	1,10	07/30/2006	4:45	1,20	0,10	14:00	
07/31/2006	3:45	2,20	07/31/2006	7:45	2,67	0,47	1,21	D	07/31/2006	12:30	1,20	07/31/2006	20:45	1,37	0,17	13:00	
07/31/2006	8:00	2,67	07/31/2006	12:30	3,50	0,83	1,20	A	07/31/2006	23:30	1,37	07/32/2006	6:45	1,40	0,03	18:15	
08/02/2006	4:45	2,26	08/02/2006	15:15	2,60	0,34	1,34	C	08/02/2006	18:30	1,35	08/03/2006	0:45	1,41	0,06	9:30	
08/03/2006	6:30	2,25	08/03/2006	9:15	2,42	0,17	1,37	D	x	x	x				-	-	
08/04/2006	2:00	2,14	08/04/2006	5:30	3,01	0,87	1,27	D	08/04/2006	9:30	1,25	08/04/2006	16:45	1,42	0,17	11:15	
08/14/2006	0:45	2,00	08/14/2006	5:30	2,19	0,19	1,07	C	08/14/2006	11:30	1,07	08/14/2006	17:45	1,12	0,05	12:15	
08/14/2006	17:30	2,04	08/14/2006	22:45	2,15	0,11	1,11	D	08/15/2006	6:30	1,09	08/15/2006	12:45	1,12	0,03	14:00	
08/18/2006	1:30	1,98	08/18/2006	4:30	2,58	0,60	1,09	C	08/18/2006	10:30	1,10	08/18/2006	15:45	1,25	0,15	11:15	
08/19/2006	3:45	2,06	08/19/2006	10:30	2,58	0,52	1,26	D	08/19/2006	13:30	1,24	08/20/2006	0:45	1,41	0,17	14:15	
08/20/2006	4:30	2,26	08/20/2006	8:00	3,26	1,00	1,37	D	08/20/2006	12:30	1,35	08/20/2006	18:45	1,45	0,10	10:45	
08/25/2006	23:00	2,07	08/26/2006	2:00	2,36	0,29	1,12	A	08/26/2006	7:30	1,13	08/26/2006	14:45	1,23	0,10	12:45	
08/27/2006	2:45	2,09	08/27/2006	6:15	2,49	0,40	1,17	D	08/27/2006	11:30	1,16	08/27/2006	17:45	1,25	0,09	11:30	
08/30/2006	7:45	1,99	08/30/2006	11:00	2,41	0,42	1,09	C	08/30/2006	17:30	1,10	08/31/2006	2:45	1,28	0,18	15:45	
08/30/2006	13:45	2,41	08/30/2006	17:00	2,52	0,11	1,10	A	x	x	x				-	-	

El Delirio							Vado Marín										Tiempo de tránsito
Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	N(Del)max		Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN		
Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		Nivel	→	Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel			
09/01/2006	5:30	2,09	09/01/2006	9:15	2,82	0,73	1,15	C	09/01/2006	13:30	1,15	09/01/2006	19:45	1,35	0,20	10:30	
09/02/2006	2:30	2,31	09/02/2006	9:30	4,14	1,83	1,29	D	09/02/2006	11:30	1,30	09/03/2006	15:45	1,55	0,25	30:15	
09/05/2006	2:30	2,15	09/05/2006	10:15	2,93	0,78	1,35	C	09/05/2006	13:30	1,36	09/05/2006	19:45	1,50	0,14	9:30	
09/07/2006	13:15	2,14	09/07/2006	17:15	2,33	0,19	1,25	D	09/07/2006	23:30	1,24	09/08/2006	3:45	1,28	0,04	10:30	
09/08/2006	3:30	2,31	09/08/2006	12:15	3,01	0,70	1,28	A	09/08/2006	12:30	1,28	09/08/2006	22:00	1,44	0,16	9:45	
09/09/2006	6:30	2,33	09/09/2006	10:45	4,51	2,18	1,35	D	09/09/2006	12:30	1,35	09/10/2006	7:45	1,63	0,28	21:00	
09/10/2006	2:30	2,73	09/10/2006	12:00	4,99	2,26	1,61	A	09/10/2006	10:30	1,59	09/11/2006	14:45	2,06	0,47	26:45	
09/11/2006	6:00	2,61	09/11/2006	10:45	3,15	0,54	2,01	A	09/11/2006	20:30	2,03	09/12/2006	2:45	2,10	0,07	16:00	
09/13/2006	0:45	2,21	09/13/2006	7:45	2,77	0,56	1,95	D	x	x	x				-	-	
09/17/2006	0:45	2,00	09/17/2006	6:15	3,10	1,10	1,45	A	09/17/2006	8:30	1,45	09/17/2006	21:00	1,54	0,09	14:45	
09/18/2006	6:30	2,13	09/18/2006	11:30	2,77	0,64	1,53	C	x	x	x				-	-	
09/19/2006	14:00	2,22	09/19/2006	20:30	2,51	0,29	1,57	C	x	x	x				-	-	
09/20/2006	1:00	2,43	09/20/2006	8:45	4,53	2,10	1,58	C	09/20/2006	21:30	1,59	09/21/2006	13:45	1,89	0,30	29:00	
09/21/2006	3:15	2,52	09/21/2006	8:45	4,36	1,84	1,84	A	09/21/2006	16:30	1,89	09/22/2006	9:00	2,13	0,24	24:15	
09/22/2006	0:45	2,58	09/22/2006	9:30	4,22	1,64	2,09	A	09/22/2006	18:15	2,10	09/23/2006	6:45	2,19	0,09	21:15	
09/30/2006	3:45	1,90	09/30/2006	9:15	2,67	0,77	1,32	C	09/30/2006	11:30	1,32	09/30/2006	18:45	1,47	0,15	9:30	
10/01/2006	2:30	2,08	10/01/2006	11:45	2,83	0,75	1,43	A	10/01/2006	11:30	1,42	10/01/2006	22:45	1,49	0,07	11:00	
10/07/2006	12:30	1,92	10/07/2006	15:30	2,34	0,42	1,22	C	10/07/2006	19:30	1,23	10/08/2006	2:45	1,34	0,11	11:15	
10/09/2006	7:00	1,96	10/09/2006	11:00	2,82	0,86	1,25	C	10/09/2006	13:30	1,25	10/09/2006	20:45	1,40	0,15	9:45	

Anexo 5 – Resultados del análisis de crecidas registradas por las estaciones La Canoa y Vado Marín durante el año 2006.

La tabla se divide en tres secciones: La Canoa, Vado Marín y Tiempo de tránsito entre ambas estaciones. Para este análisis al igual que el realizado anteriormente entre El Delirio y Vado Marín, se incluyeron en el análisis el nivel y la tendencia del río en Vado Marín al momento en que se registró el nivel máximo de la crecida en La Canoa.

La Canoa							Vado Marín									Tiempo de tránsito
Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	N(Del)max		Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	
Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		Nivel	→	Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		
04/08/2012	21:30	1,01	04/09/2012	1:30	1,43	0,42	0,44	C	04/09/2012	8:15	0,45	04/09/2012	16:15	0,72	0,27	14:45
04/09/2012	10:30	1,34	41156,00	14:30	1,50	0,16	0,68	A	04/09/2012	22:00	0,73	41186,00	1:45	0,78	0,05	11:15
04/18/2012	6:30	1,44	04/18/2012	10:30	4,49	3,05	0,96	D	04/19/2012	4:15	1,19	04/19/2012	14:30	1,47	0,28	28:00
04/19/2012	4:15	2,22	04/19/2012	11:00	3,51	1,29	1,43	A	04/19/2012	21:45	1,47	04/20/2012	8:45	1,53	0,06	21:45
04/22/2012	13:30	1,34	04/22/2012	18:45	1,96	0,62	1,00	C	04/22/2012	22:30	1,01	04/23/2012	4:45	1,12	0,11	10:00
05/22/2012	0:15	1,75	05/22/2012	4:00	3,69	1,94	1,31	C	x	x	x	05/23/2012	2:15	1,70	Error	22:15
05/23/2012	5:45	1,78	05/23/2012	10:00	2,56	0,78	1,66	D	05/24/2012	0:00	1,42	05/24/2012	6:45	1,45	0,03	20:45
05/24/2012	9:30	1,62	05/24/2012	14:15	2,14	0,52	1,42	D	x	x	x				-	-
05/25/2012	13:00	1,53	05/25/2012	17:30	1,77	0,24	1,26	D	x	x	x				-	-
05/25/2012	23:15	1,65	05/26/2012	4:15	3,22	1,57	1,21	D	05/26/2012	16:45	1,18	05/27/2012	3:00	1,47	0,29	22:45
05/27/2012	8:45	1,61	05/27/2012	14:30	2,60	0,99	1,39	D	05/28/2012	6:00	1,27	05/28/2012	11:30	1,35	0,08	21:00
06/01/2012	7:30	1,29	06/01/2012	14:15	3,03	1,74	0,92	C	06/02/2012	4:15	0,88	06/02/2012	16:45	1,27	0,39	26:30
06/04/2012	6:00	1,34	06/04/2012	12:15	2,17	0,83	1,00	D	06/05/2012	7:45	1,02	06/05/2012	21:45	1,10	0,08	33:30
06/05/2012	8:15	1,47	06/05/2012	18:45	1,87	0,40	1,07	A	x	x	x				-	-
06/06/2012	7:45	1,50	06/06/2012	11:15	2,24	0,74	1,08	C	06/07/2012	2:30	1,08	06/07/2012	15:30	1,18	0,10	28:15
06/10/2012	2:00	1,23	06/10/2012	8:45	2,85	1,62	0,80	C	06/11/2012	1:45	0,94	06/11/2012	12:45	1,15	0,21	28:00

La Canoa							Vado Marín										Tiempo de tránsito
Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	N(Del)max		Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN		
Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		Nivel	→	Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel			
06/11/2012	7:00	1,56	06/11/2012	11:30	2,09	0,53	1,14	A	x	x	x				-	-	
06/17/2012	10:00	1,27	06/17/2012	16:00	2,47	1,20	0,81	D	06/18/2012	12:45	1,01	06/18/2012	23:45	1,12	0,11	31:45	
06/19/2012	16:45	1,38	06/20/2012	1:30	1,67	0,29	1,02	C	x	x	x				-	-	
06/20/2012	4:30	1,65	06/20/2012	8:30	2,39	0,74	1,02	C	06/21/2012	1:30	1,01	06/21/2012	11:15	1,11	0,10	26:45	
07/03/2012	15:15	1,12	40975,00	20:45	1,44	0,32	0,60	C	07/04/2012	0:45	0,60	41006,00	8:45	0,78	0,18	12:00	
07/05/2012	5:45	1,15	07/05/2012	10:00	2,06	0,91	0,67	D	07/05/2012	13:45	0,65	07/05/2012	23:00	0,87	0,22	13:00	
07/11/2012	8:15	1,07	07/11/2012	12:00	1,50	0,43	0,57	C	07/11/2012	17:45	0,57	07/12/2012	3:00	0,79	0,22	15:00	
08/01/2012	21:30	0,94	08/02/2012	6:45	1,18	0,24	0,45	C	08/02/2012	9:45	0,45	08/02/2012	21:45	0,63	0,18	15:00	
08/02/2012	20:15	1,11	08/03/2012	1:30	1,50	0,39	0,63	D	08/03/2012	6:15	0,61	08/03/2012	13:45	0,78	0,17	12:15	
08/03/2012	9:45	1,34	08/03/2012	13:45	2,31	0,97	0,78	A	08/03/2012	17:00	0,78	08/04/2012	3:30	0,90	0,12	13:45	
08/08/2012	5:30	1,04	08/08/2012	8:45	3,23	2,19	0,64	C	08/09/2012	4:45	0,94	08/09/2012	16:00	1,14	0,20	31:15	
08/10/2012	3:00	1,37	08/10/2012	12:00	4,10	2,73	1,09	C	08/11/2012	0:30	1,07	08/11/2012	15:15	1,58	0,51	27:15	
08/11/2012	0:00	2,40	41221,00	3:00	2,64	0,24	1,20	A	x	x	x				-	-	
08/11/2012	21:45	1,75	08/12/2012	6:00	2,55	0,80	1,52	D	08/12/2012	18:00	1,39	08/13/2012	1:30	1,43	0,04	19:30	
08/13/2012	1:30	1,62	08/13/2012	4:45	1,89	0,27	1,43	C	x	x	x				-	-	
08/13/2012	10:15	1,68	08/13/2012	14:15	2,31	0,63	1,38	D	x	x	x				-	-	
08/15/2012	7:15	1,36	08/15/2012	11:45	2,09	0,73	1,21	D	x	x	x				-	-	
08/15/2012	14:00	2,00	08/15/2012	17:30	2,50	0,50	1,18	D	08/16/2012	5:30	1,16	08/16/2012	18:00	1,36	0,20	24:30	
08/16/2012	3:00	1,89	08/16/2012	8:15	2,62	0,73	1,21	A	08/16/2012	23:15	1,38	08/17/2012	5:00	1,42	0,04	20:45	
08/18/2012	9:45	1,52	08/18/2012	14:30	2,15	0,63	1,22	D	08/19/2012	11:00	1,21	08/19/2012	17:30	1,25	0,04	27:00	

La Canoa							Vado Marín										Tiempo de tránsito
Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN	N(Del)max		Inicio de la repunta			Nivel máximo			ΔN		
Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel		Nivel	→	Fecha	Hora	Nivel	Fecha	Hora	Nivel			
08/19/2012	1:30	1,71	08/19/2012	12:45	3,22	1,51	1,23	C	08/20/2012	0:15	1,26	08/20/2012	12:15	1,49	0,23	23:30	
08/22/2012	9:30	1,38	08/22/2012	14:30	2,42	1,04	1,15	D	08/23/2012	0:45	1,13	08/23/2012	4:00	1,18	0,05	13:30	
08/23/2012	8:00	1,60	08/23/2012	11:30	1,85	0,25	1,21	A	x	x	x				-	-	
08/24/2012	10:45	1,35	08/24/2012	14:45	3,57	2,22	1,22	D	08/25/2012	5:00	1,21	08/25/2012	16:15	1,53	0,32	25:30	
08/25/2012	5:15	1,95	08/25/2012	14:30	2,59	0,64	1,51	A	x	x	x				-	-	
08/26/2012	4:30	1,76	08/26/2012	9:00	2,72	0,96	1,54	D	x	x	x				-	-	
08/27/2012	0:45	1,75	08/27/2012	5:15	3,76	2,01	1,51	C	08/27/2012	18:00	1,51	08/28/2012	4:30	1,66	0,15	23:15	
08/29/2012	9:00	1,45	08/29/2012	13:45	2,15	0,70	1,34	D	x	x	x				-	-	
08/30/2012	7:45	1,93	08/30/2012	11:45	2,25	0,32	1,26	C	x	x	x				-	-	
08/30/2012	23:30	1,81	08/31/2012	6:00	4,16	2,35	1,35	C	08/31/2012	15:00	1,37	08/32/2012	6:00	1,78	0,41	24:00	
09/01/2012	3:45	2,23	09/01/2012	8:30	3,98	1,75	1,77	C	09/01/2012	20:30	1,74	09/02/2012	7:15	1,83	0,09	22:45	
09/02/2012	5:00	2,01	09/02/2012	9:15	4,48	2,47	1,82	D	09/02/2012	19:15	1,76	09/03/2012	7:00	1,92	0,16	21:45	
09/05/2012	2:30	1,63	09/05/2012	7:00	2,83	1,20	1,53	D	09/05/2012	20:15	1,45	09/06/2012	9:00	1,64	0,19	26:00	
09/06/2012	2:00	1,82	09/06/2012	6:00	4,21	2,39	1,61	A	09/06/2012	16:30	1,64	09/07/2012	4:15	1,89	0,25	22:15	
09/07/2012	0:45	2,19	09/07/2012	5:45	4,31	2,12	1,88	C	09/07/2012	16:45	1,86	X	X	X	-	-	
09/08/2012	1:00	2,60	09/08/2012	4:30	4,94	2,34	2,13	A	x	x	x	09/09/2012	3:45	2,86	2,86	23:15	
09/09/2012	1:00	3,13	09/09/2012	5:15	4,22	1,09	2,85	A	09/09/2012	21:00	2,87	09/10/2012	2:15	2,92	0,05	21:00	
09/10/2012	8:30	2,47	09/10/2012	13:45	3,61	1,14	2,82	D	x	x	x				-	-	
09/11/2012	6:15	3,64	09/11/2012	8:30	3,80	0,16	2,65	D	09/11/2012	21:45	2,56	09/12/2012	2:00	2,58	0,02	17:30	

En amarillo se marca la crecida en que la Laguna El Jocotal alcanzó la planicie con el Río Grande de San Miguel.

Anexo 6 – Tabla Resumen del cálculo del Índice de Sinuosidad del RGSM.

Índice de Sinuosidad del Rio Grande de San Miguel					
Estación	Tramo	longitud cauce (m)	longitud eje (m)	longitud (km)	Índice de Sinuosidad
	1	2044.0	1420.9	2.0	1.4
villerías	2	1524.1	1293.2	3.6	1.2
	3	4726.6	1894.8	8.3	2.5
	4	2144.3	1843.5	10.4	1.2
	5	2373.0	1776.7	12.8	1.3
P. Moscoso	6	3281.2	2212.7	16.1	1.5
	7	1060.9	664.3	17.2	1.6
	8	1410.4	732.2	18.6	1.9
	9	1834.9	1126.1	20.4	1.6
	10	2962.4	1235.4	23.4	2.4
	11	1606.1	670.8	25.0	2.4
	12	3886.3	3339.0	28.9	1.2
	13	853.5	473.2	29.7	1.8
	14	1194.3	1093.8	30.9	1.1
	15	4527.1	4071.5	35.4	1.1
	16	644.4	478.1	36.1	1.3
	17	349.9	253.9	36.4	1.4
	18	568.6	515.9	37.0	1.1
	19	1406.5	1360.1	38.4	1.0
	20	1173.2	843.6	39.6	1.4
	21	494.9	298.8	40.1	1.7
	22	2503.8	2046.7	42.6	1.2
	23	935.9	847.6	43.5	1.1
	24	1641.2	1448.6	45.1	1.1
	25	3983.2	2210.6	49.1	1.8
	26	1763.1	1346.3	50.9	1.3
La Canoa	27	1854.6	1124.5	52.7	1.6
	28	848.3	783.1	53.6	1.1
	29	540.3	449.7	54.1	1.2
	30	931.5	834.9	55.1	1.1
	31	1385.1	789.0	56.5	1.8
	32	2030.3	666.7	58.5	3.0
	33	496.4	368.4	59.0	1.3
	34	1172.7	664.2	60.2	1.8

Índice de Sinuosidad del Río Grande de San Miguel					
Estación	Tramo	longitud cauce (m)	longitud eje (m)	longitud (km)	Índice de Sinuosidad
	35	660.0	349.8	60.8	1.9
	36	1068.3	644.6	61.9	1.7
	37	963.4	414.9	62.8	2.3
	38	484.6	382.7	63.3	1.3
	39	387.9	363.2	63.7	1.1
	40	473.1	415.1	64.2	1.1
	41	783.7	358.9	65.0	2.2
	42	882.6	630.2	65.9	1.4
	43	1522.7	653.9	67.4	2.3
	44	784.0	349.6	68.2	2.2
	45	2720.7	839.3	70.9	3.2
	46	1211.6	782.2	72.1	1.5
	47	1707.0	802.8	73.8	2.1
	48	1069.1	741.7	74.9	1.4
	49	1589.1	398.3	76.5	4.0
	50	2331.8	1039.6	78.8	2.2
	51	2412.2	1219.2	81.2	2.0
Vado Marín	52	2665.9	2180.2	83.9	1.2
	53	2900.0	2660.8	86.8	1.1
Moropala	54	2273.7	1381.5	89.0	1.6
	55	1416.4	1194.5	90.5	1.2
	56	7893.9	7141.9	98.4	1.1
	57	3082.4	2389.8	101.4	1.3
Las conchas	58	3160.9	2971.9	104.6	1.1
	59	2606.8	1862.3	107.2	1.4
	60	1055.9	939.0	108.3	1.1
	61	5027.5	4264.6	113.3	1.2
Desembocadura	62	1521.2	1287.0	114.8	1.2

Anexo 7 – Tabla resumen de elevaciones del perfil del RGSM.

Estacion	Distancia (km)	Elev. (msnm)	Desnivel(m)	tramo(km)	Pendiente (%)
	0.0	93.7			
villeras	3.4	90.4	4.8	5.0	0.097
	5.0	88.9			
			4.6	5.0	0.091
	10.0	84.3			
			6.5	5.0	0.129
	15.0	77.9			
P. Moscoso	15.2	77.8	2.4	5.0	0.047
	20.0	75.5			
			4.7	5.0	0.094
	25.0	70.8			
			2.3	5.0	0.046
	30.0	68.5			
			3.8	5.0	0.076
	35.0	64.7			
			4.8	5.0	0.095
	40.0	60.0			
			1.1	5.0	0.022
	45.0	58.9			
			15.5	5.0	0.309
	50.0	43.4			
La Canoa	52.0	34.1	14.0	5.0	0.281
	55.0	29.4			
			8.1	5.0	0.163
	60.0	21.2			
			4.7	5.0	0.093
	65.0	16.6			
			-0.5	5.0	-0.010
	70.0	17.0			
			1.2	5.0	0.023
	75.0	15.9			
			-1.0	5.0	-0.021
	80.0	16.9			
Vado Marin	82.7	20.1	-3.0	5.0	-0.061
	85.0	19.9			
Moropala	86.9	20.0	3.5	5.0	0.070
	90.0	16.4			
			0.0	5.0	-0.001
	95.0	16.5			
			8.4	5.0	0.168
	100.0	8.1			
Las conchas	103.5	0.5	7.6	5.0	0.152
	105.0	0.5			
			-0.9	5.0	-0.018
	110.0	1.4			
			-1.5	4.9	-0.031
	114.8	2.9			

8.2. Anexos del capítulo 4

Anexo 8 – Tablas de ramificación de caudal utilizadas para la Laguna El Jocotal.

Tabla A		Tabla B		Tabla C	
Q.Total (m ³ /s)	Q.Main (m ³ /s)	Q.Total (m ³ /s)	Q.Main (m ³ /s)	Q.Total (m ³ /s)	Q.Main (m ³ /s)
0	0.000	0	0.000	0	0.000
5	5.000	5	5.000	10	10.000
10	10.000	10	10.000	20	20.000
15	15.000	15	15.000	30	30.000
20	19.424	20	20.000	40	40.000
25	23.044	25	25.000	50	50.000
30	26.028	30	29.510	60	60.000
35	28.545	35	33.580	70	70.000
40	30.764	40	37.230	80	79.193
45	32.852	45	40.500	90	86.301
50	34.980	50	43.440	100	91.595
55	37.314	60	48.480	110	95.345
60	40.024	70	52.650	120	97.823
65	43.278	80	56.250	130	99.300
70	47.244	90	59.620	140	100.047
75	52.092	100	63.050	150	100.336
80	52.092	110	66.860	160	100.438
85	52.092	120	71.370	170	100.623
90	52.092	130	76.870	180	101.163
95	52.092	140	83.700	190	102.329
100	52.092	150	92.150	200	104.392
110	52.092	160	92.150	210	107.624
120	52.092	170	92.150	220	112.295
130	52.092	180	92.150	230	118.677
140	52.092	190	92.150	240	127.041
150	52.092	200	92.150	244	131.002
200	52.092	300	92.150	250	131.002
800	52.092	800	92.150	800	131.002

Anexo 9 – Tablas de ramificación de caudal utilizadas para la Laguna de Olomega.

Tabla A		Tabla B		Tabla C		Tabla D	
Q.Total (m ³ /s)	Q.Main (m ³ /s)						
0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
5	5.000	10	10.000	5	5.000	5	5.000
10	10.000	20	20.000	10	10.000	12	12.000
15	15.000	30	30.000	15	15.000	15	14.952
20	19.860	40	40.000	20	20.000	20	19.674
25	24.560	50	50.000	25	25.000	25	24.159
30	29.110	60	60.000	30	30.000	30	28.416
35	33.500	70	69.870	35	35.000	35	32.455
40	37.740	80	79.130	40	40.000	40	36.287
45	41.820	90	87.750	45	45.000	45	39.922
50	45.740	100	95.760	50	50.000	50	43.368
60	53.140	110	103.160	60	60.000	60	49.740
70	59.960	120	109.980	70	69.360	70	55.481
80	66.230	130	116.250	80	77.690	80	60.673
90	72.000	140	122.020	90	85.060	90	65.396
100	77.320	150	127.330	100	91.510	100	69.730
110	82.250	160	132.270	110	97.100	110	73.756
120	86.870	170	136.880	120	101.890	120	77.553
130	91.250	180	141.260	130	105.920	130	81.202
140	95.480	190	145.500	140	109.260	140	84.783
150	99.670	200	149.690	150	111.950	150	88.376
160	103.930	210	153.950	160	114.060	160	92.063
170	108.370	220	158.390	170	115.620	170	95.922
180	113.130	230	163.140	180	116.710	180	100.034
190	118.330	240	168.350	190	117.360	190	104.480
200	124.140	250	174.150	200	117.640	200	109.340
220	138.180	260	180.710	220	117.640	210	114.694
240	156.610	270	188.190	240	117.640	220	120.622
260	156.610	280	196.770	260	117.640	230	127.205
280	156.610	290	206.620	280	117.640	240	134.522
300	156.610	300	206.620	300	117.640	250	142.655
500	156.610	500	206.620	500	117.640	260	151.683
800	156.610	800	206.620	800	117.640	800	151.683

Anexo 10 – Períodos de uso de cada tabla de ramificación de caudal.

Estación Puente Moscoso.- Aporta caudal a la Laguna de Olomega.

Tabla	Período 1	Período 2	Período 3
A	01/01/1970 – 01/09/1973	01/01/1974 – 31/12/1979	01/01/1981 – 31/12/1991
B	02/09/1973 – 31/12/1973	01/01/2010 – 31/12/2013	-
C	01/01/1980 – 31/12/1980	-	-
D	01/01/1992 – 31/12/2009	-	-

Estación La Canoa.- Aporta caudal a la Laguna El Jocotal.

Tabla	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4
A	01/01/1970 – 31/12/1973	01/01/1975 – 31/12/1975	01/01/1977 – 31/12/1978	01/01/1982 – 31/12/1991
B	01/01/1974 – 31/12/1974	01/01/1976 – 31/12/1976	01/01/1979 – 31/12/1979	-
C	01/01/1980 – 31/12/1981	-	-	-
D	01/01/1992 – 31/10/2006	-	-	-
E	01/11/2006 – 15/09/2010	-	-	-
F	16/09/2010 – 31/12/2013	-	-	-

Anexo 11 – Curva de almacenamiento para la Laguna de Olomega.

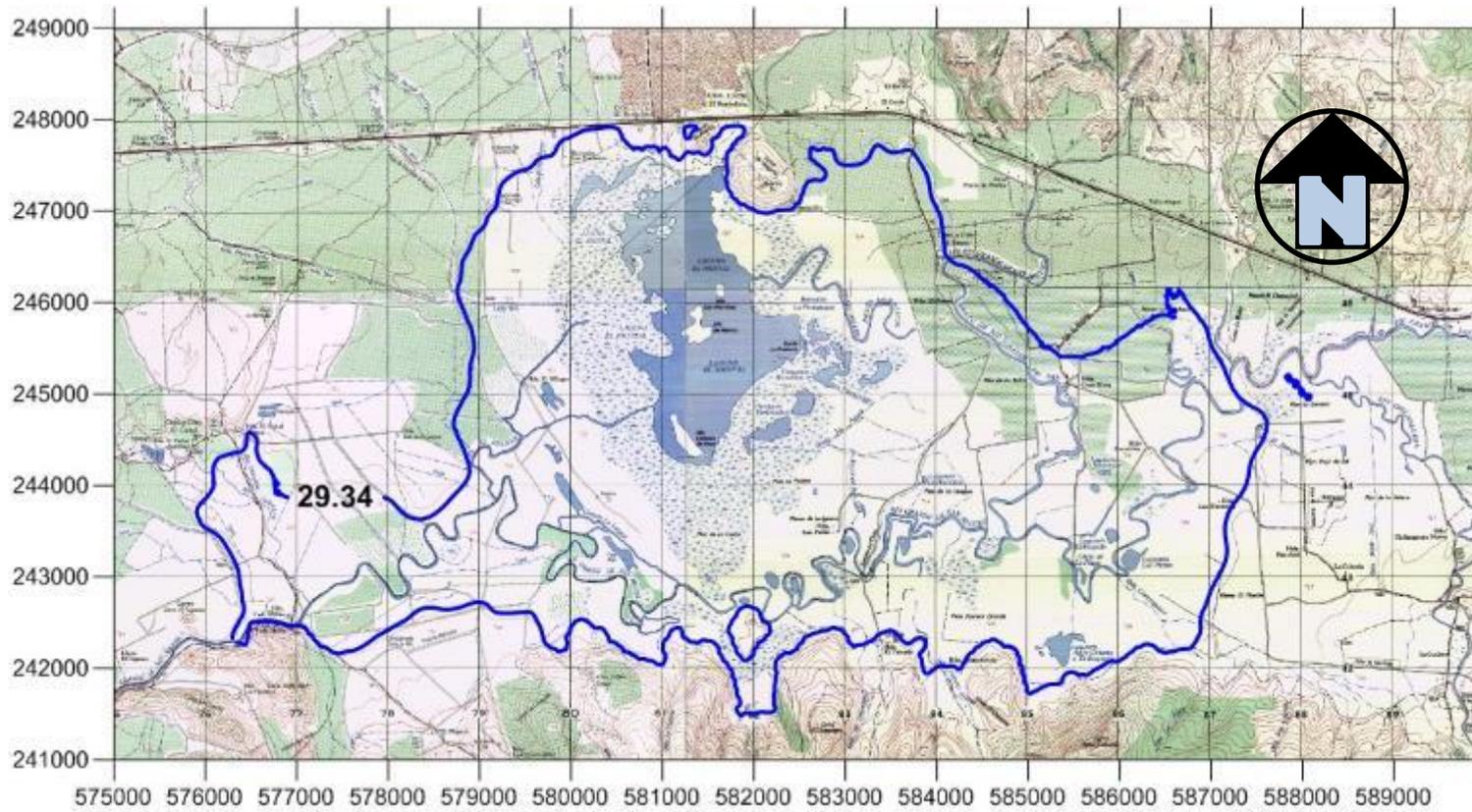
Nivel (msnm)	Volumen (m³)
59.00	0
59.25	3376788
59.50	6899713
59.75	10571503
60.00	14391197
60.25	18359160
60.50	22486268
60.75	26764310
61.00	31192488
61.25	35774724
61.50	40541108
61.75	45554020
62.00	50893616
62.25	57020868
62.50	63362240
62.75	69862648
63.00	82231048
63.25	90667872
63.50	99329944
63.75	108200160
64.00	117288080
64.25	126594384
64.50	136113888
64.75	145847088
65.00	155815168
65.25	166044864
65.50	176608592
65.75	187563744
66.00	199036400
66.25	210889104
66.50	223111216
66.75	235757744
67.00	248803248
67.25	262243056

Anexo 12 – Curvas de descarga utilizadas para la Laguna de Olomega.

DESCARGA 1	
Período 1: 01/01/1970 – 30/04/1975	
Período 2: 01/12/1980 – 30/11/1980	
Nivel (msnm)	Descarga (m³/s)
59.00	0.600
59.50	0.650
60.00	0.700
60.50	0.750
61.00	0.800
61.50	0.850
61.60	0.860
61.70	0.870
61.80	1.015
61.90	1.185
62.00	1.383
62.10	1.615
62.20	1.885
62.30	2.201
62.40	2.569
62.50	2.999
62.60	3.501
62.70	4.091
62.80	5.099
62.90	6.100
63.00	7.100
63.10	8.098
63.20	9.095
63.30	10.089
63.40	11.083
63.50	12.074
64.00	17.010
64.50	21.907
65.00	26.766
65.50	31.588
66.00	36.373
66.50	41.122
67.00	45.836
67.25	48.180

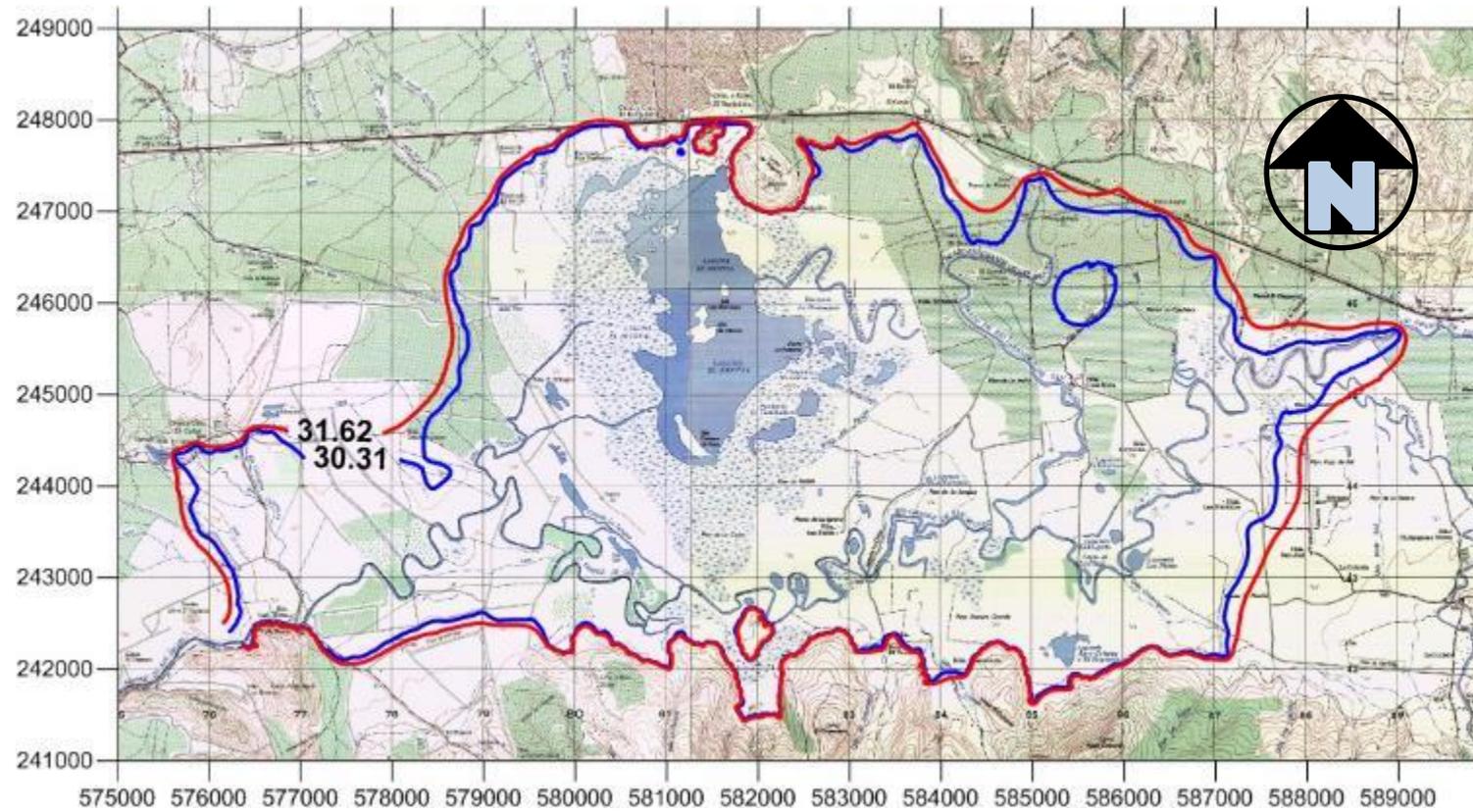
DESCARGA 2	
Período 1: 01/05/1975 – 30/11/1980	
Período 2: 01/01/1999 – 31/12/2013	
Nivel (msnm)	Descarga (m³/s)
59.00	1.140
59.50	1.170
60.00	1.200
60.50	1.230
61.00	1.270
61.50	1.291
61.60	1.292
61.70	1.308
61.80	1.345
61.90	1.411
62.00	1.512
62.10	1.655
62.20	1.847
62.30	2.095
62.40	2.405
62.50	2.796
62.60	3.598
62.70	4.388
62.80	5.177
62.90	5.965
63.00	6.751
63.10	7.536
63.20	8.320
63.30	9.103
63.40	9.884
63.50	10.664
64.00	14.547
64.50	18.400
65.00	22.222
65.50	26.016
66.00	29.781
66.50	33.517
67.00	37.225
67.25	39.069

Anexo 13 – Planicie de inundación generada por la Tormenta Tropical Chris en 1988, según nivel modelado.



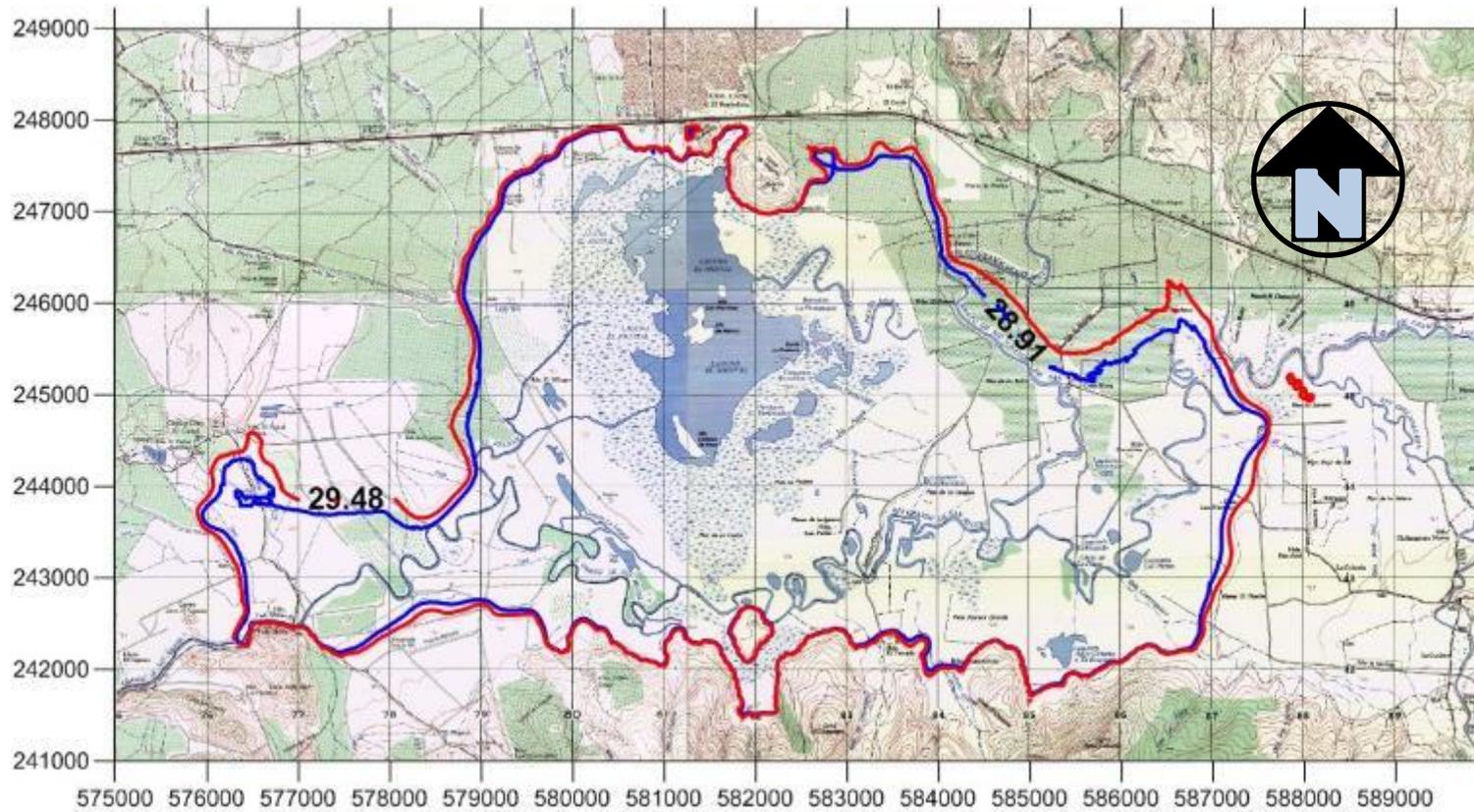
Tormenta Tropical Chris – 1988	Nivel (m.s.n.m.)
Nivel registrado	Sin registro
Nivel modelado	29.34

Anexo 14 – Planicie de inundación causada por el Huracán Mitch en 1998, según nivel registrado y nivel modelado.



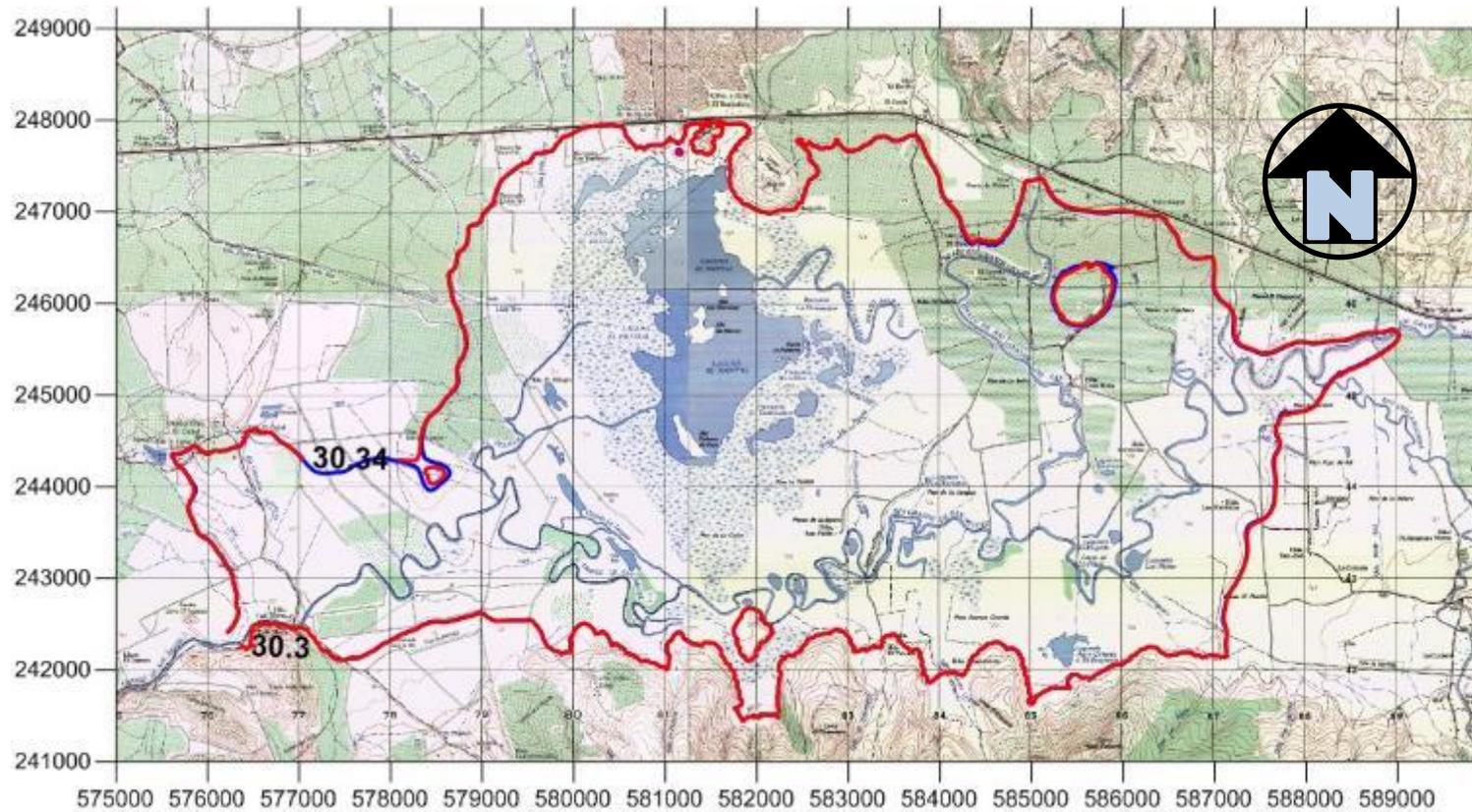
Huracán Mitch – 1998	Nivel (m.s.n.m.)
Nivel registrado	31.62
Nivel modelado	30.31

Anexo 15 – Planicie de inundación causada por la Tormenta Tropical Agatha en 2010, según nivel registrado y nivel modelado.



Tormenta Tropical Agatha – 2010		Nivel (m.s.n.m.)
Nivel registrado		29.48
Nivel modelado		28.91

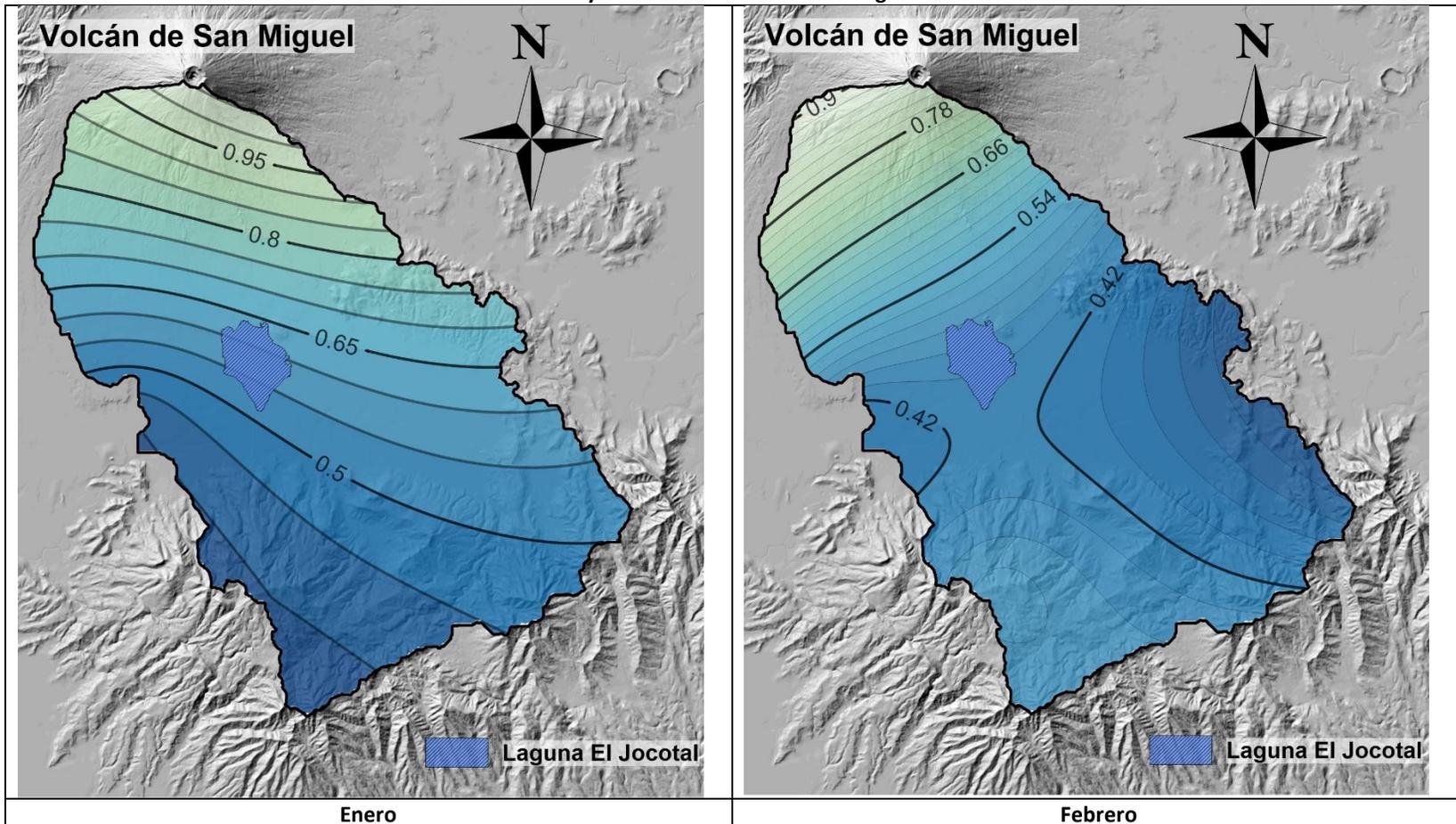
Anexo 16 – Planicie de inundación causada por la Depresión Tropical 12E en 2011, según nivel registrado y nivel modelado.

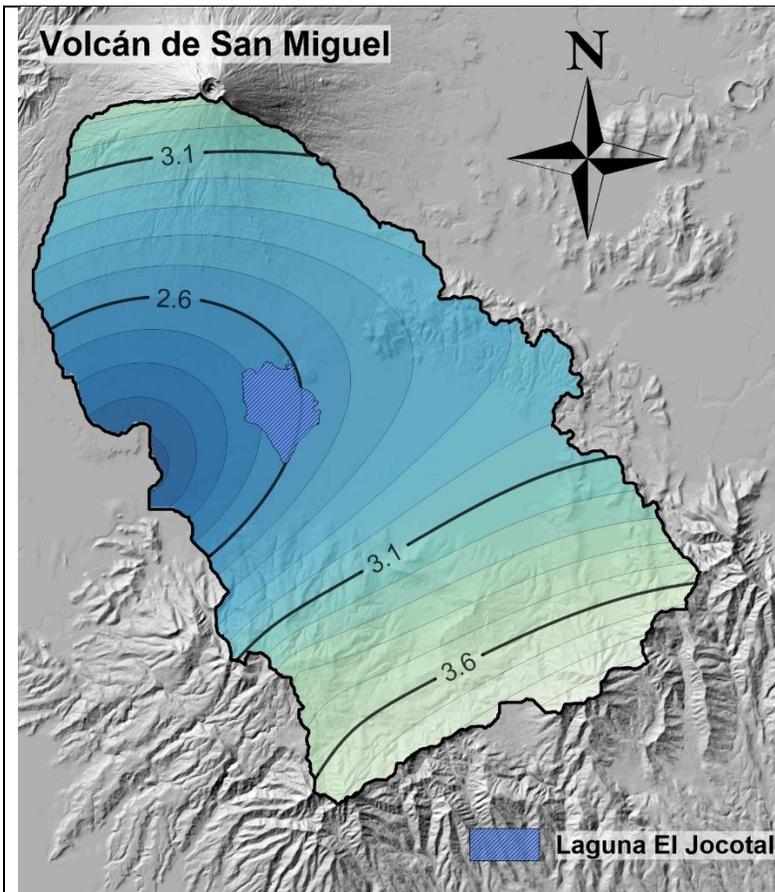


Depresión Tropical 12E – 2011	Nivel (m.s.n.m.)
Nivel registrado	30.34
Nivel modelado	30.30

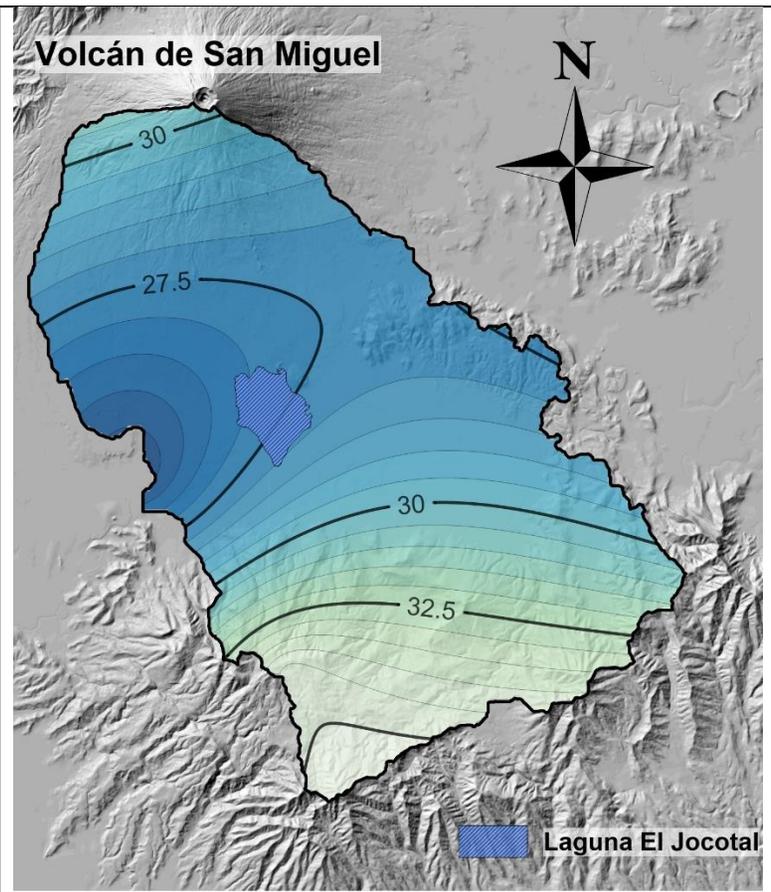
8.3. Anexos del capítulo 5

Anexo 17 – Isoyetas sobre la cuenca de la Laguna El Jocotal.

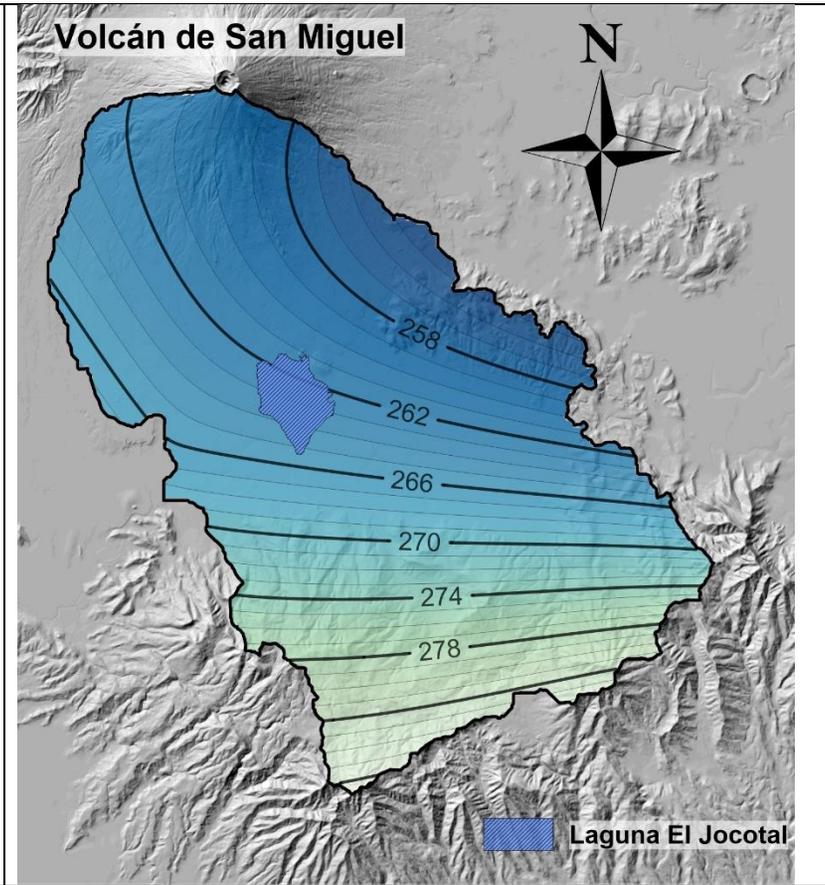
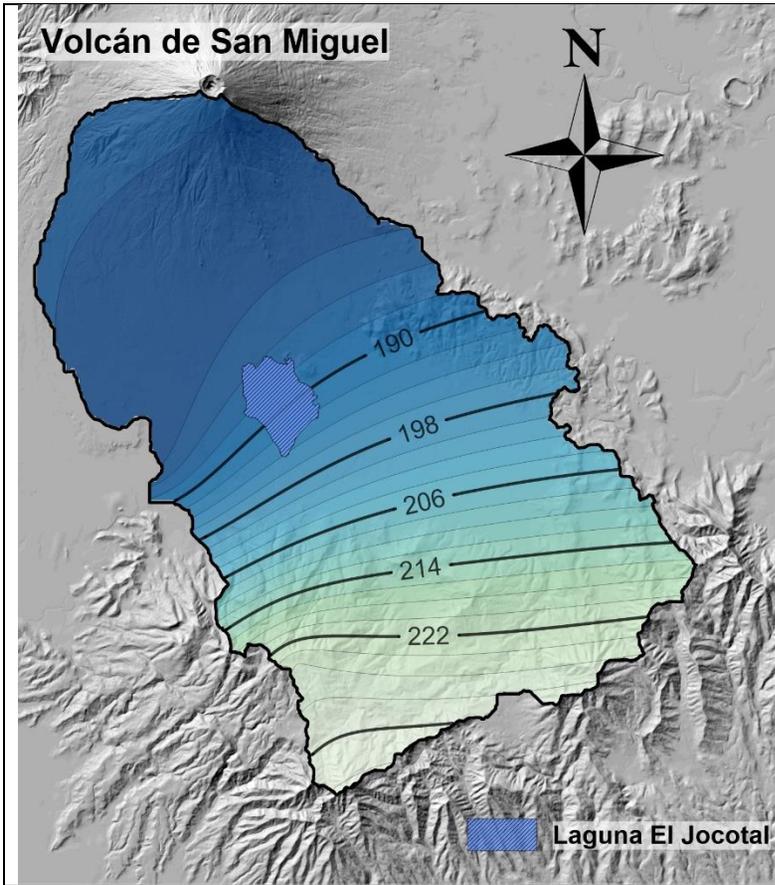


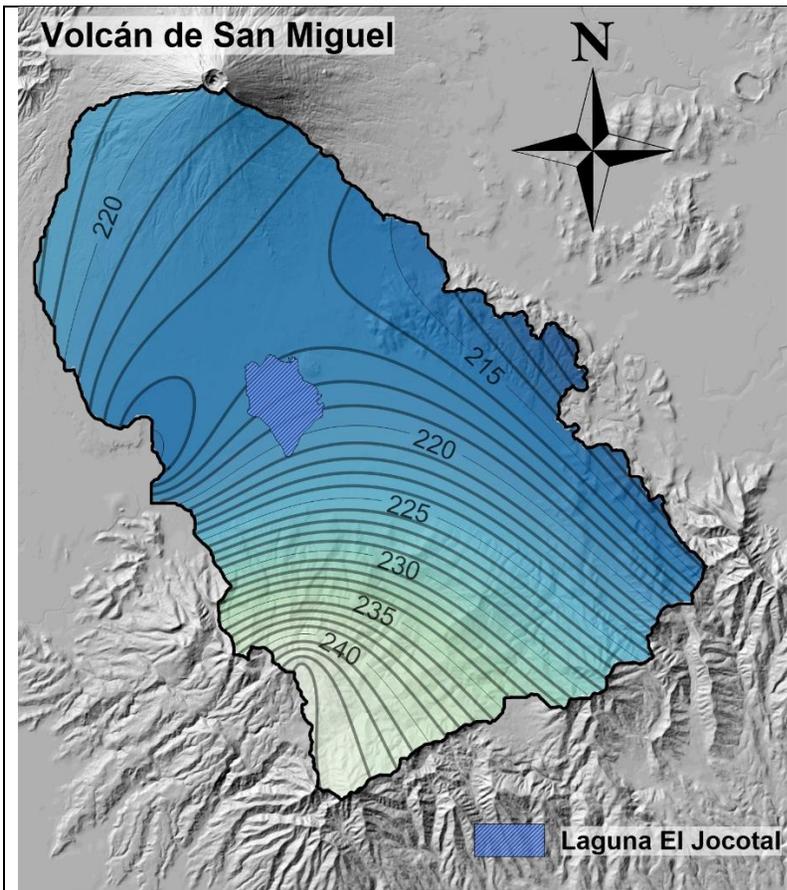


Marzo

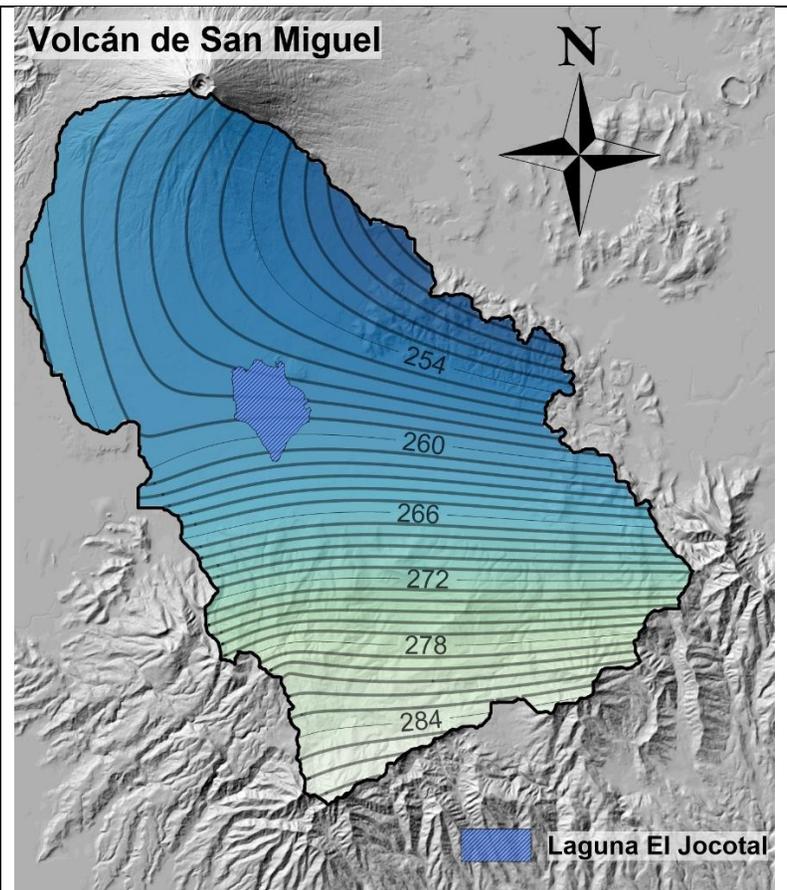


Abril

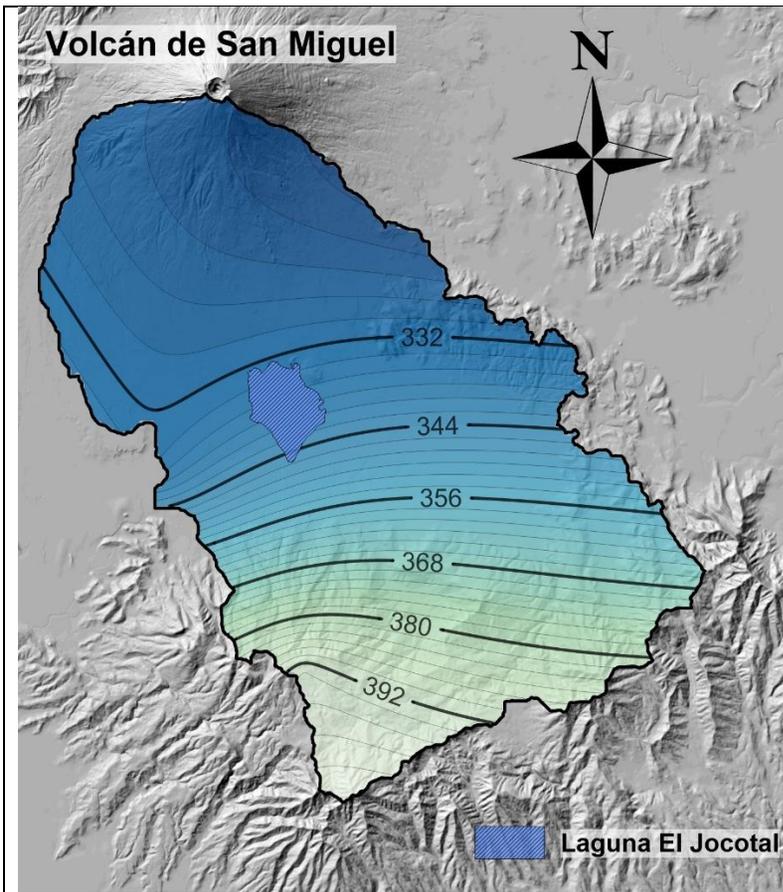




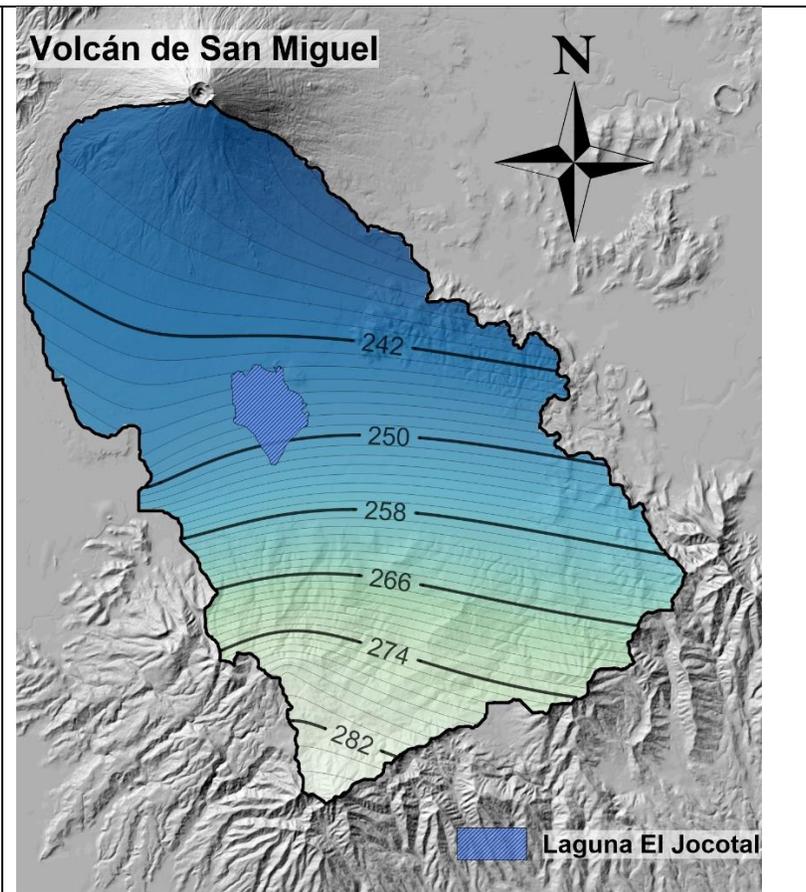
Julio



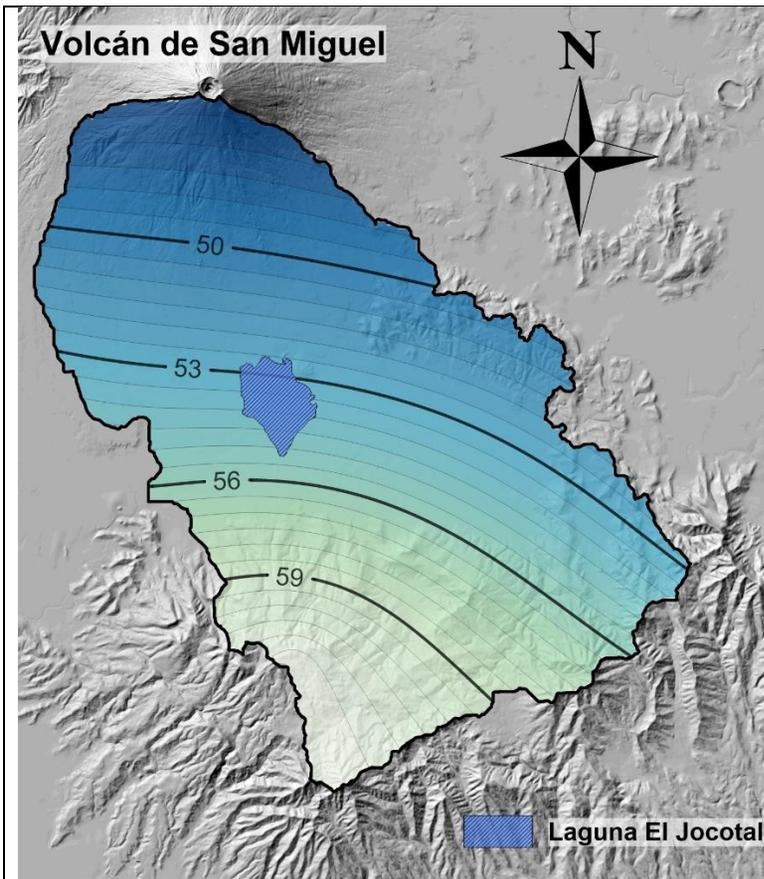
Agosto



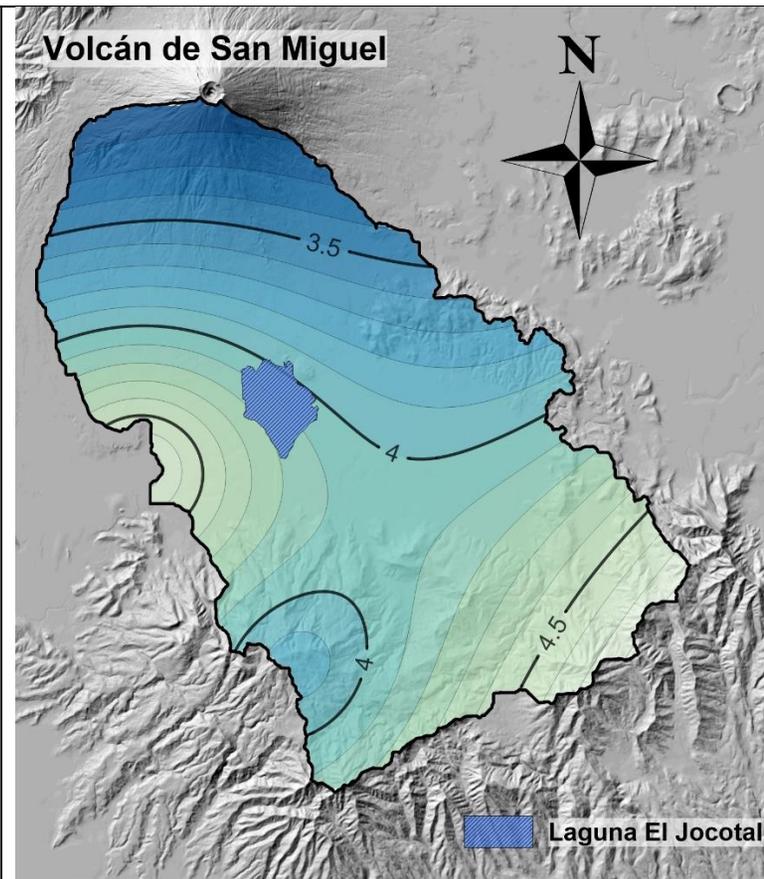
Septiembre



Octubre

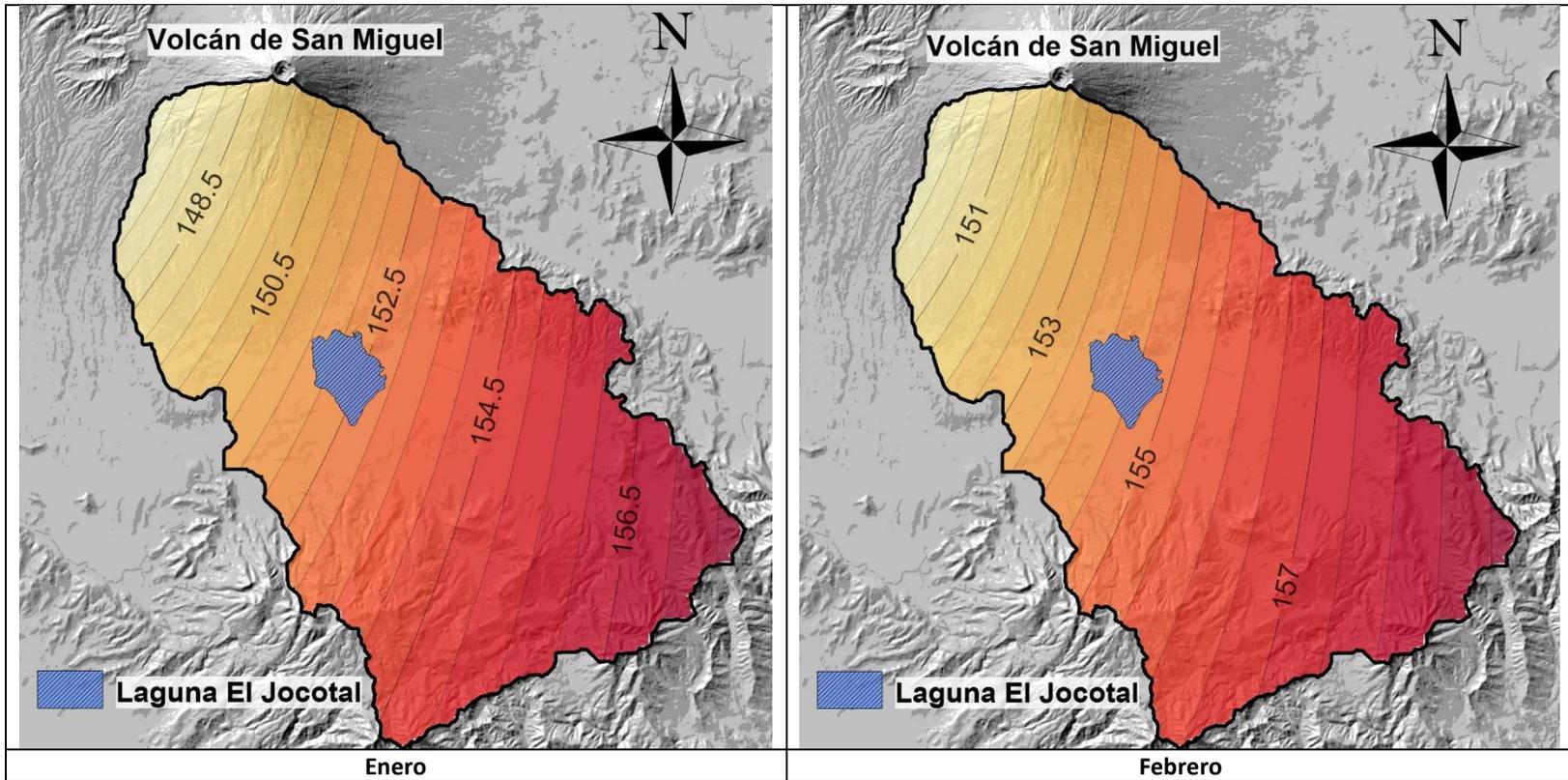


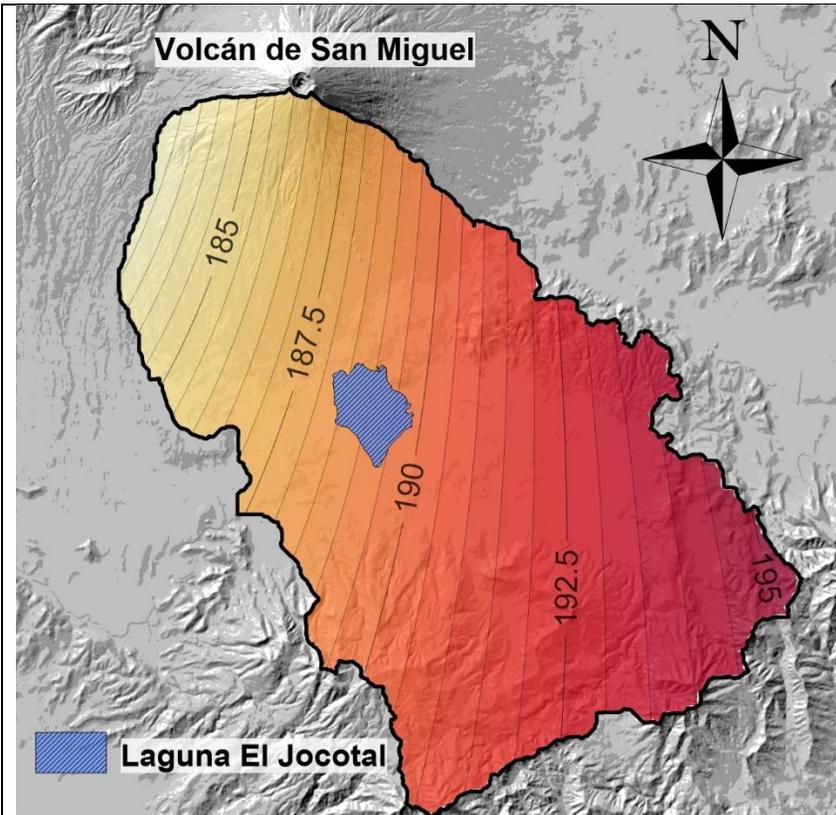
Noviembre



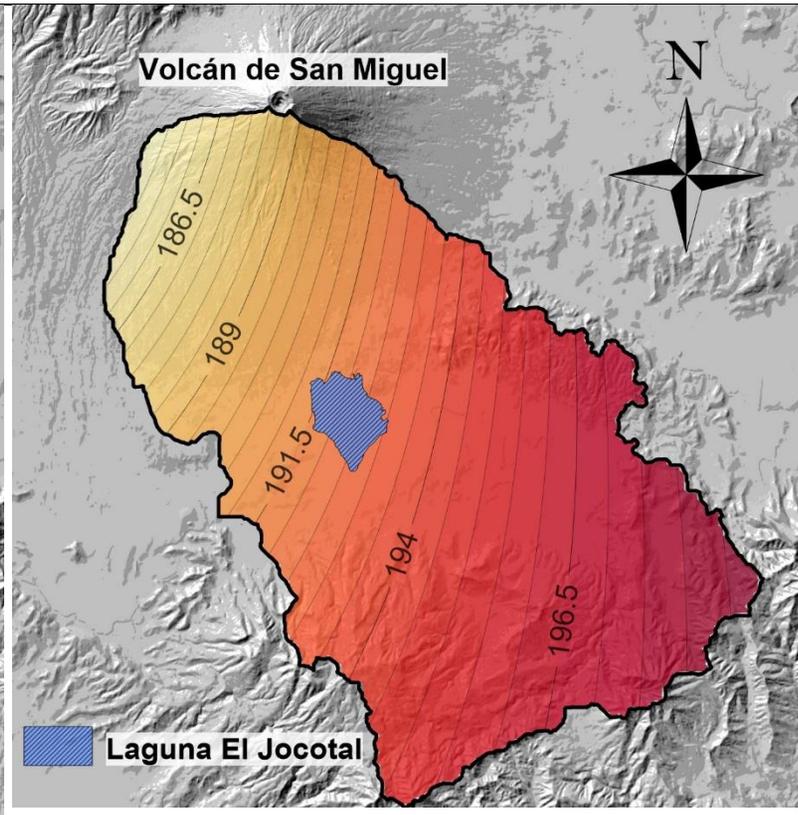
Diciembre

Anexo 18 – Isolíneas de evapotranspiración sobre la cuenca de la Laguna El Jocotal.

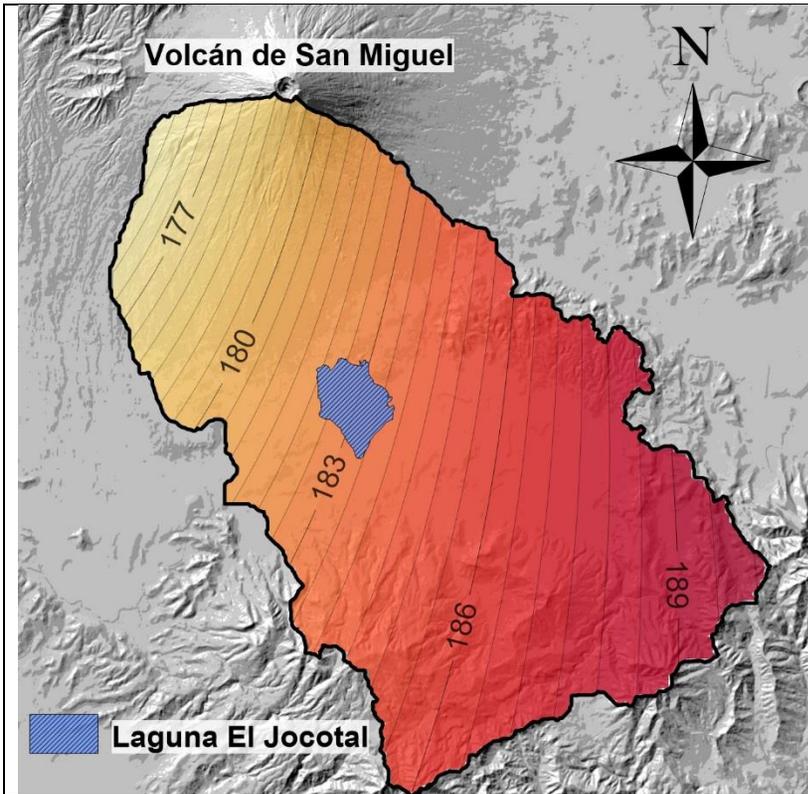




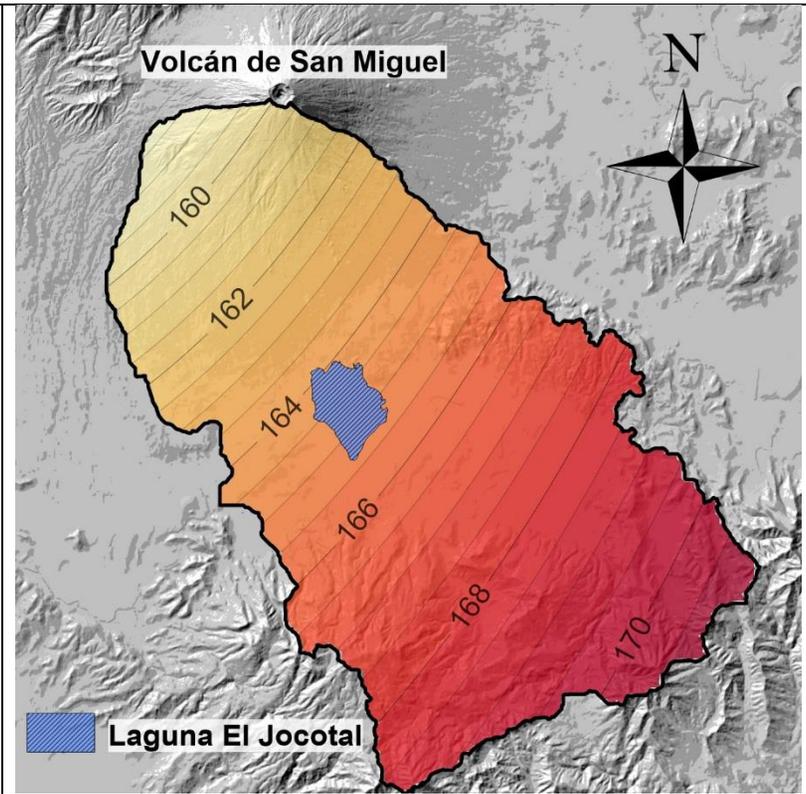
Marzo



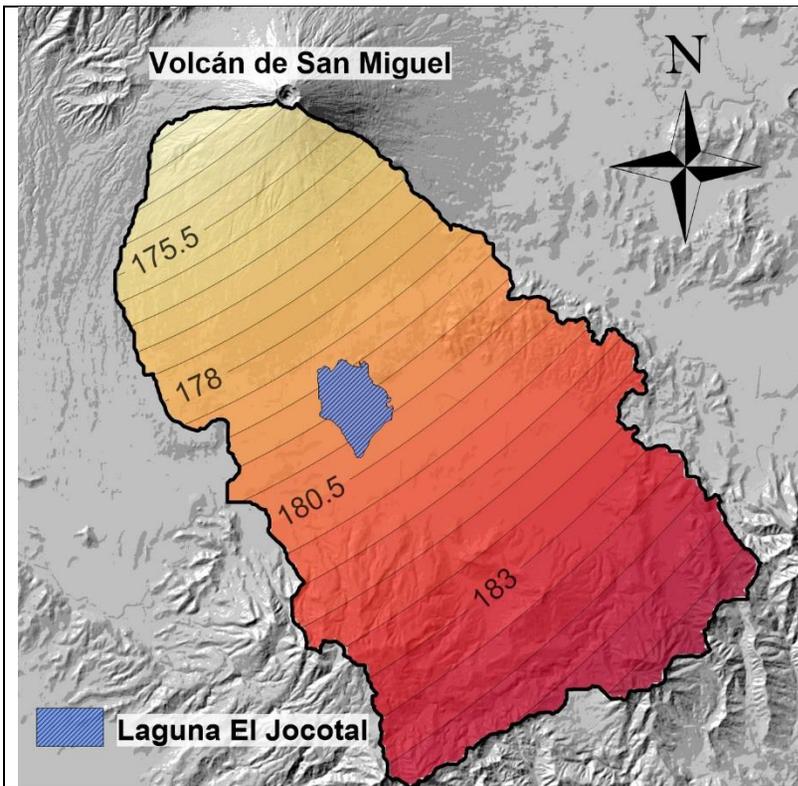
Abril



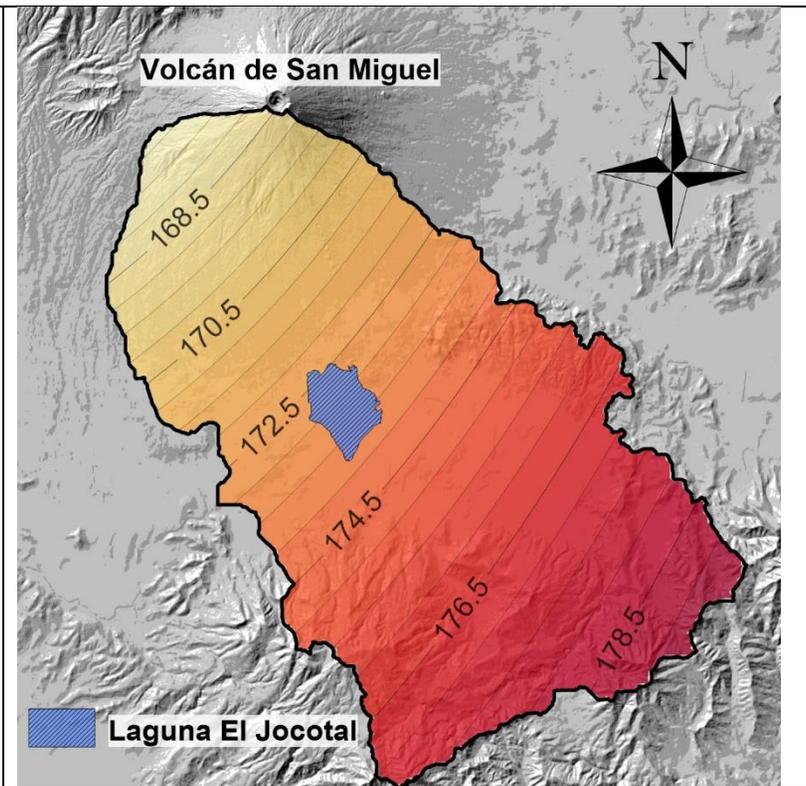
Mayo



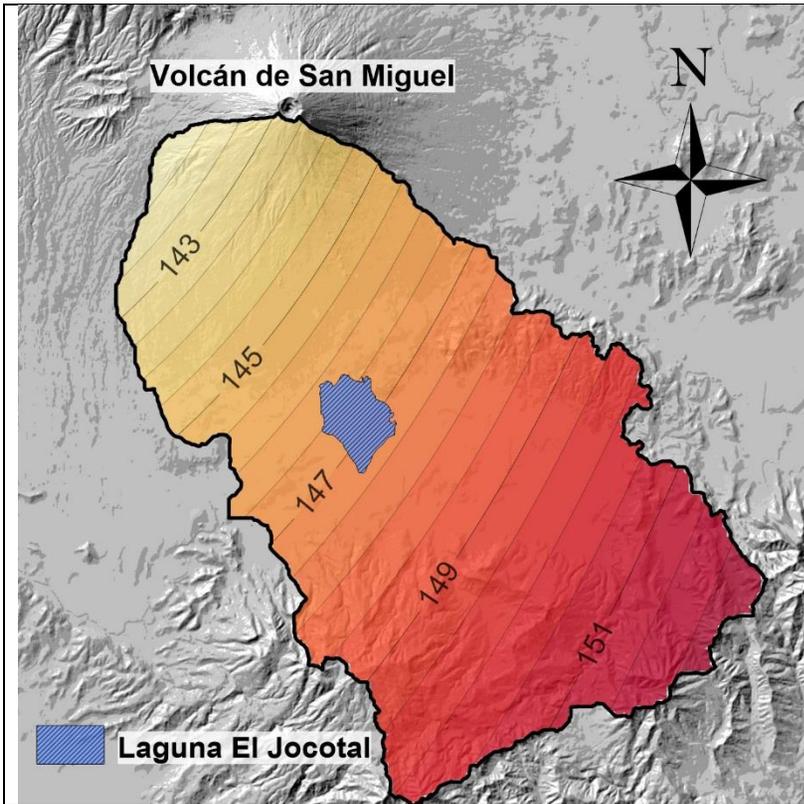
Junio



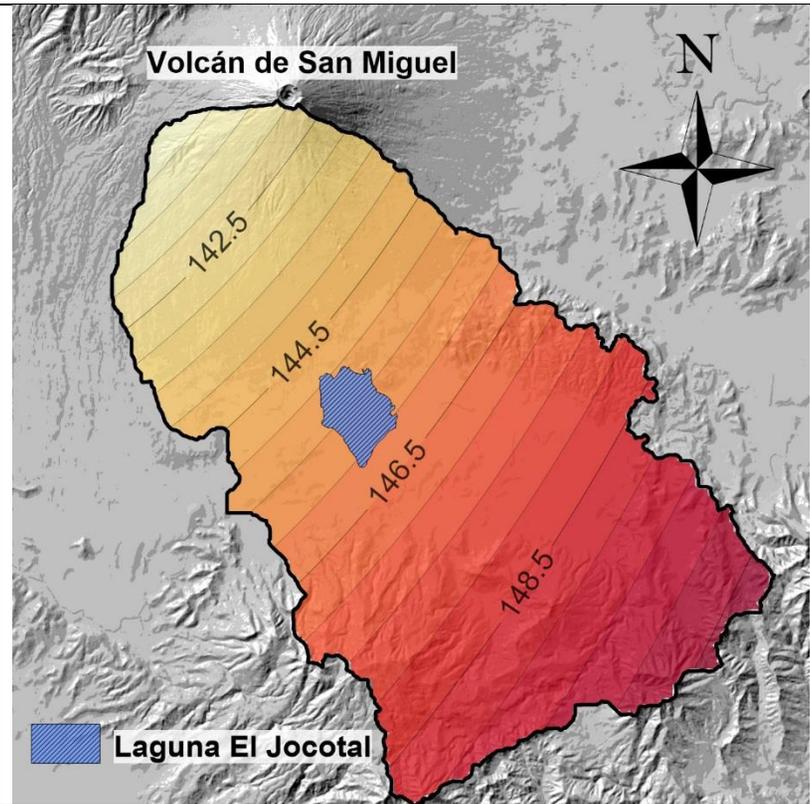
Julio



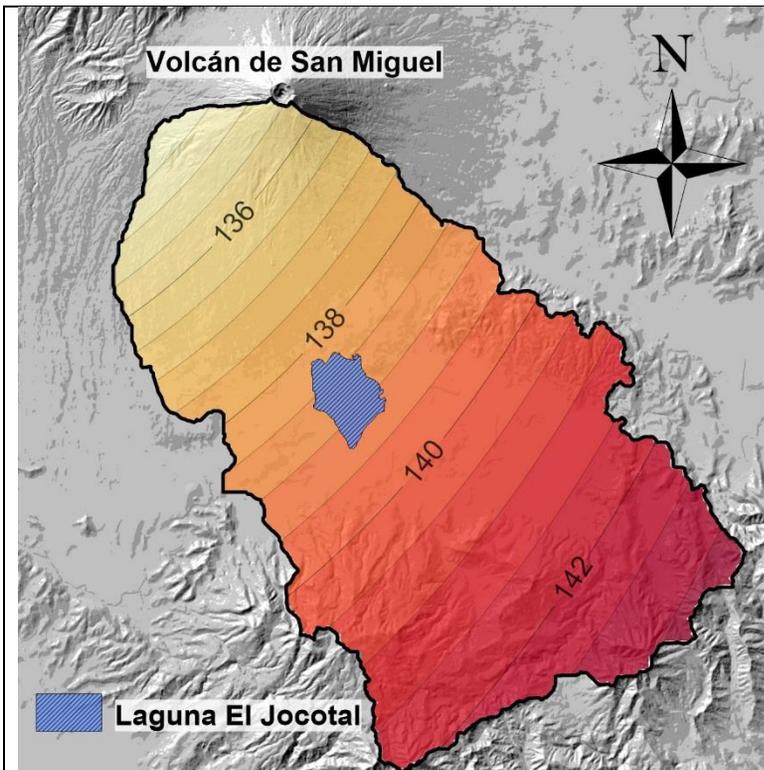
Agosto



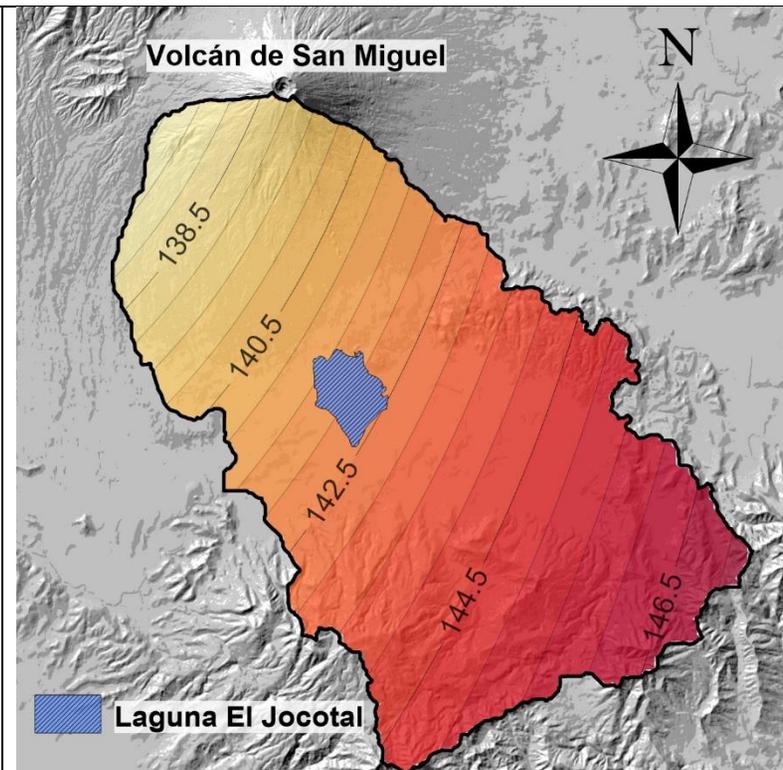
Septiembre



Octubre



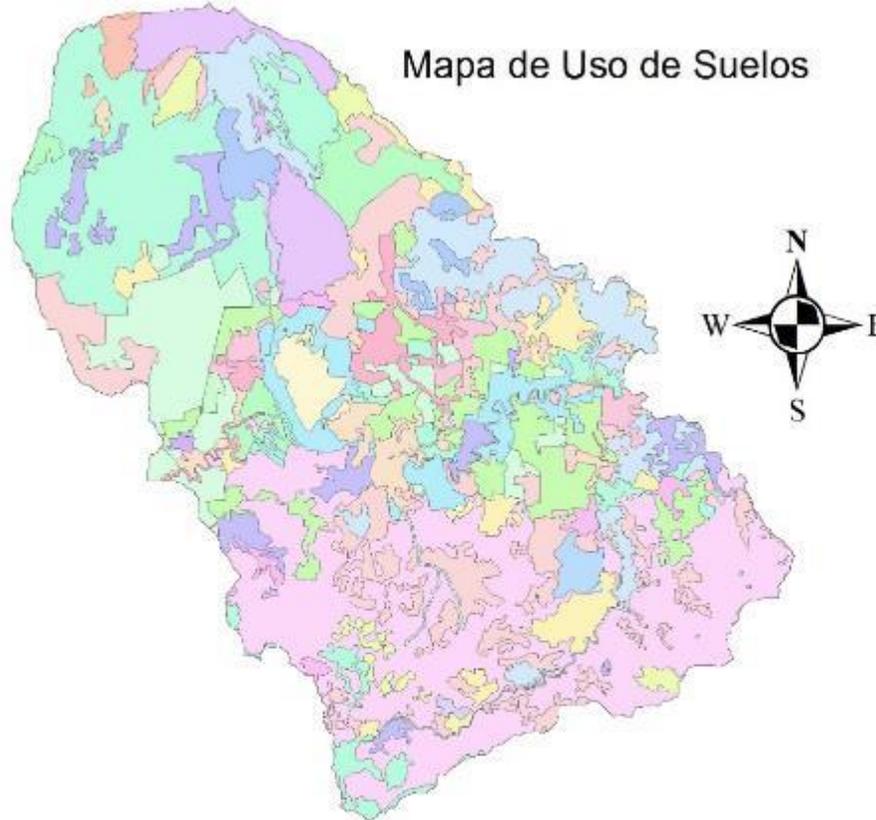
Noviembre



Diciembre

Anexo 19 - Mapa de uso de suelos de la subcuenca Laguna El Jocotal.

Mapa de Uso de Suelos



 Árboles Frutales	 Cultivos Anuales Asociados con Cultivos	 Pastos Cultivados	 Vegetación Arbustiva Baja
 Bosque Caducifolio	 Espacios con Vegetación Escasa	 Pastos Naturales	 Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
 Bosque Siempre Verdes	 Granos Básicos	 Plantaciones de Bosques Monoespecífico	 Vegetación herbácea natural
 Bosque de Galería	 Lagos, legunas y lagunetas	 Praderas Pantanosas	 Zonas Quemadas
 Bosques mixtos semi caducifolios	 Mosaico de Cultivos y Pastos	 Roquedas, levas	
 Café	 Mosaico de Cultivos, Pastos y Vegetación	 Ríos	
 Caña de Azúcar	 Otros Cultivos Irrigados	 Tejido Urbano Discontinuo	

Anexo 20 – Coeficientes de cultivo (kc) para los diferentes tipos de cultivo existentes en la cuenca de la Laguna El Jocotal.

uso de suelo	Área (m2)	% de área	Kc											
			ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Tejido Urbano Discontinuo	2688026.45	0.93	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Granos Básicos	41311035.89	14.26	1	1	1	1	0.35	1	1.05	1.05	0.6	1	1	1
Pastos Cultivados	4221956.42	1.46	1	1	1	1	1	1	1	1	1.1	1.1	1.1	1
Pastos Naturales	34287116.46	11.83	1	1	1	1	1	1	1	1	1.1	1.1	1.1	1
Cultivos Anuales Asociados con Cultivos	8007781.86	2.76	1	1	1	1	0.7	1	1.05	1.05	1	1	1	1
Mosaico de Cultivos y Pastos	17873854.66	6.17	1	1	1	1	1	1	1	1.05	1.05	1	1	1
Mosaico de Cultivos, Pastos y Vegetación	11312497.90	3.90	1	1	1	1	1	1	1	1.05	1.05	1	1	1
Plantaciones de Bosques Monoespecífico	275569.53	0.10	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Bosque de Galería	5651282.04	1.95	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Vegetación herbácea natural	22113567.04	7.63	1	1	1	1	1	1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	1
Vegetación Arbustiva Baja	11395907.12	3.93	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Roqueda, lavas	12276528.22	4.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Espacios con Vegetación Escasa	4592960.58	1.59	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Zonas Quemadas	4531263.04	1.56	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Praderas Pantanosas	10580743.86	3.65	1.15	1.15	1.15	1.15	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.15
Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	89666.68	0.03	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Ríos	1867722.94	0.64	1.15	1.15	1.15	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Lagos, lagunas y lagunetas	3537831.24	1.22	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Otros Cultivos Irrigados	476809.64	0.16	1	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1
Café	2112224.29	0.73	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Árboles Frutales	1785084.90	0.62	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Caña de Azúcar	18410730.79	6.35	0.6	0.8	0.9	0.9	1	1	1	1	1.05	1.15	1.15	0.85
Bosque Caducifolio	1086220.90	0.37	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Bosque Siempre Verdes	5741591.44	1.98	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Bosques mixtos semi caducifolios	63504408.120	21.92	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

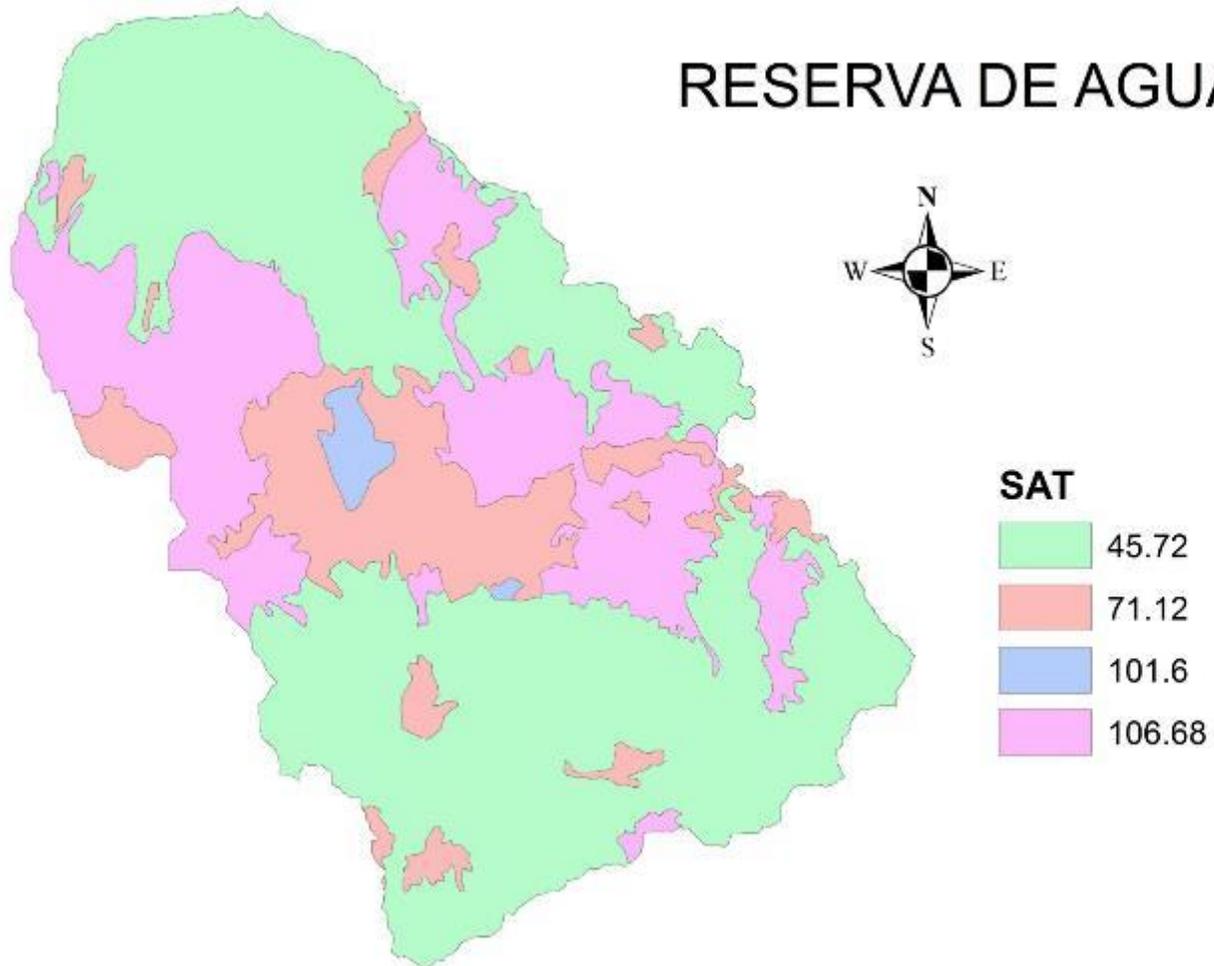
Anexo 21 – Cálculo de la evapotranspiración de cultivo promedio. Parte 1.

uso de suelo		Granos Básicos		Pastos Cultivados		Pastos Naturales		Cultivos Anuales Asociados con Cultivos		Mosaico de Cultivos y Pastos		Mosaico de Cultivos, Pastos y Vegetación		Plantaciones de Bosques Monoespecífico		Bosque de Galería		Vegetación herbácea natural		Vegetación Arbustiva Baja		Roqueda, lavas	
Área (m2)		41311035.89		4221956.42		34287116.46		8007781.86		17873854.66		11312497.90		275569.53		5651282.04		22113567.04		11395907.12		12276528.22	
% de área		14.67%		1.50%		12.17%		2.84%		6.35%		4.02%		0.10%		2.01%		7.85%		4.05%		4.36%	
Mes	ETP	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%
enero	153.1	1.0	22.5	1.0	2.3	1.0	18.6	1.0	4.4	1.0	9.7	1.0	6.1	0.6	0.1	0.6	1.8	1.0	12.0	0.7	4.3	0.0	0.0
febrero	155.1	1.0	22.7	1.0	2.3	1.0	18.9	1.0	4.4	1.0	9.8	1.0	6.2	0.6	0.1	0.6	1.9	1.0	12.2	0.7	4.4	0.0	0.0
marzo	190.0	1.0	27.9	1.0	2.8	1.0	23.1	1.0	5.4	1.0	12.1	1.0	7.6	0.6	0.1	0.6	2.3	1.0	14.9	0.7	5.4	0.0	0.0
abril	193.2	1.0	28.3	1.0	2.9	1.0	23.5	1.0	5.5	1.0	12.3	1.0	7.8	0.6	0.1	0.6	2.3	1.0	15.2	0.7	5.5	0.0	0.0
mayo	184.0	0.4	9.4	1.0	2.8	1.0	22.4	0.7	3.7	1.0	11.7	1.0	7.4	0.6	0.1	0.6	2.2	1.0	14.4	0.7	5.2	0.0	0.0
junio	165.6	1.0	24.3	1.0	2.5	1.0	20.2	1.0	4.7	1.0	10.5	1.0	6.7	0.6	0.1	0.6	2.0	1.0	13.0	0.7	4.7	0.0	0.0
julio	180.4	1.1	27.8	1.0	2.7	1.0	22.0	1.1	5.4	1.0	11.4	1.0	7.2	0.6	0.1	0.6	2.2	1.0	14.2	0.7	5.1	0.0	0.0
agosto	174.1	1.1	26.8	1.0	2.6	1.0	21.2	1.1	5.2	1.1	11.6	1.1	7.3	0.6	0.1	0.6	2.1	1.1	15.0	0.7	4.9	0.0	0.0
septiembre	147.7	0.6	13.0	1.1	2.4	1.1	19.8	1.0	4.2	1.1	9.8	1.1	6.2	0.6	0.1	0.6	1.8	1.1	12.8	0.7	4.2	0.0	0.0
octubre	146.4	1.0	21.5	1.1	2.4	1.1	19.6	1.0	4.2	1.0	9.3	1.0	5.9	0.6	0.1	0.6	1.8	1.1	12.6	0.7	4.1	0.0	0.0
noviembre	139.4	1.0	20.5	1.1	2.3	1.1	18.7	1.0	4.0	1.0	8.8	1.0	5.6	0.6	0.1	0.6	1.7	1.1	12.0	0.7	3.9	0.0	0.0
diciembre	144.4	1.0	21.2	1.0	2.2	1.0	17.6	1.0	4.1	1.0	9.2	1.0	5.8	0.6	0.1	0.6	1.7	1.0	11.3	0.7	4.1	0.0	0.0
		265.8		30.2		245.5		55.0		126.2		79.9		1.2		23.8		159.7		55.9		0.0	

Anexo 22 – Cálculo de la evapotranspiración de cultivo promedio. Parte 2.

uso de suelo		Espacios con Vegetación Escasa		Zonas Quemadas		Praderas Pantanosas		Vegetación acuática sobre cuerpos de agua		Otros Cultivos Irrigados		Café		Árboles Frutales		Caña de Azúcar		Bosque Caducifolio		Bosque Siempre Verdes		Bosques mixtos semicaducifoleos		Área total de la cuenca
Área (m2)		4592960.58		4531263.04		10580743.86		89666.68		476809.64		2112224.29		1785084.90		18410730.79		1086220.90		5741591.44		63504408.12		281638801.393
% de área		1.63%		1.61%		3.76%		0.03%		0.17%		0.75%		0.63%		6.54%		0.39%		2.04%		22.55%		100%
Mes	ETP	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	
enero	153.1	1.0	2.5	1.0	2.5	1.2	6.6	1.1	0.1	1.0	0.3	0.7	0.8	0.6	0.6	0.6	6.0	0.6	0.4	0.6	1.9	0.6	20.7	124.1
febrero	155.1	1.0	2.5	1.0	2.5	1.2	6.7	1.1	0.1	1.1	0.3	0.7	0.8	0.6	0.6	0.8	8.1	0.6	0.4	0.6	1.9	0.6	21.0	127.8
marzo	190.0	1.0	3.1	1.0	3.1	1.2	8.2	1.1	0.1	1.1	0.3	0.7	1.0	0.6	0.7	0.9	11.2	0.6	0.4	0.6	2.3	0.6	25.7	157.7
abril	193.2	1.0	3.2	1.0	3.1	1.2	8.3	1.1	0.1	1.1	0.3	0.7	1.0	0.6	0.7	0.9	11.4	0.6	0.4	0.6	2.4	0.6	26.1	160.4
mayo	184.0	1.0	3.0	1.0	3.0	1.1	7.6	1.1	0.1	1.1	0.3	0.7	1.0	0.6	0.7	1.0	12.0	0.6	0.4	0.6	2.3	0.6	24.9	134.5
junio	165.6	1.0	2.7	1.0	2.7	1.1	6.8	1.1	0.1	1.1	0.3	0.7	0.9	0.6	0.6	1.0	10.8	0.6	0.4	0.6	2.0	0.6	22.4	138.3
julio	180.4	1.0	2.9	1.0	2.9	1.1	7.5	1.1	0.1	1.1	0.3	0.7	0.9	0.6	0.7	1.0	11.8	0.6	0.4	0.6	2.2	0.6	24.4	152.2
agosto	174.1	1.0	2.8	1.0	2.8	1.1	7.2	1.1	0.1	1.1	0.3	0.7	0.9	0.6	0.7	1.0	11.4	0.6	0.4	0.6	2.1	0.6	23.5	149.1
septiembre	147.7	1.0	2.4	1.0	2.4	1.1	6.1	1.1	0.0	1.1	0.3	0.7	0.8	0.6	0.6	1.1	10.1	0.6	0.3	0.6	1.8	0.6	20.0	119.1
octubre	146.4	1.0	2.4	1.0	2.4	1.1	6.0	1.1	0.0	1.1	0.3	0.7	0.8	0.6	0.6	1.2	11.0	0.6	0.3	0.6	1.8	0.6	19.8	126.8
noviembre	139.4	1.0	2.3	1.0	2.2	1.1	5.8	1.1	0.0	1.1	0.2	0.7	0.7	0.6	0.5	1.2	10.5	0.6	0.3	0.6	1.7	0.6	18.9	120.8
diciembre	144.4	1.0	2.4	1.0	2.3	1.2	6.2	1.1	0.0	1.0	0.2	0.7	0.8	0.6	0.5	0.9	8.0	0.6	0.3	0.6	1.8	0.6	19.5	119.4
		32.2		31.7		83.1		0.7		3.5		10.4		7.5		122.3		4.6		24.1		267.0		1630.3

Anexo 23 – Mapa de reserva de agua útil.



Anexo 24 – Evaporación sobre la cuenca.

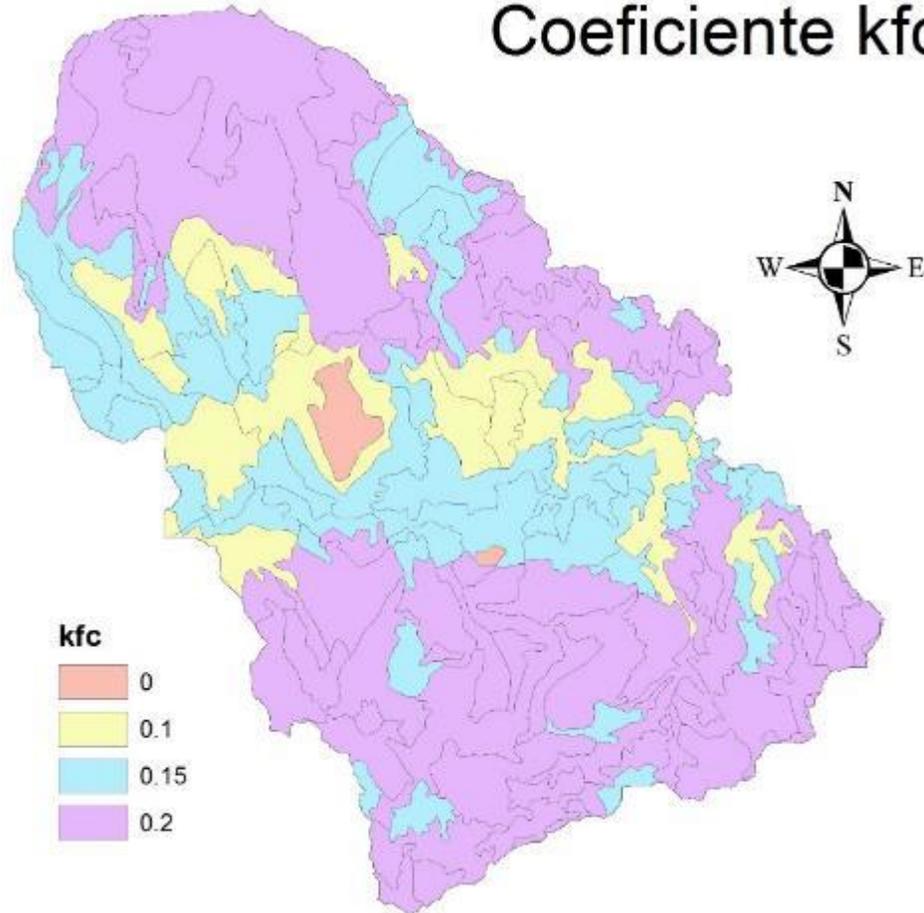
Uso de suelo		Tejido Urbano Discontinuo		Ríos		Lagos, lagunas y lagunetas		Área total de la cuenca
Área (m2)		2688026.45		1867722.94		3537831.24		8093580.63
% de área		33.21%		23.08%		43.71%		100.00%
Mes	ETP	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	Kc	Kc*A%	
Enero	153.072036	0.1	5.0838	1.15	40.622	1.05	70.256	115.96
febrero	155.09043	0.1	5.1508	1.15	41.158	1.05	71.182	117.49
marzo	189.965079	0.1	6.3091	1.15	50.413	1.05	87.189	143.91
abril	193.160952	0.1	6.4152	1.1	49.032	1.05	88.655	144.10
mayo	183.954797	0.1	6.1095	1.1	46.696	1.05	84.43	137.24
junio	165.632777	0.1	5.501	1.1	42.045	1.05	76.021	123.57
julio	180.376847	0.1	5.9906	1.1	45.787	1.05	82.788	134.57
agosto	174.066659	0.1	5.7811	1.1	44.186	1.05	79.892	129.86
septiembre	147.655328	0.1	4.9039	1.1	37.481	1.05	67.77	110.15
octubre	146.36119	0.1	4.8609	1.1	37.153	1.05	67.176	109.19
noviembre	139.44665	0.1	4.6313	1.1	35.397	1.05	64.002	104.03
diciembre	144.414348	0.1	4.7963	1.1	36.659	1.05	66.282	107.74
			65.533		506.63		905.64	1477.80

Anexo 25 – Cálculo del coeficiente de uso de suelo ponderado.

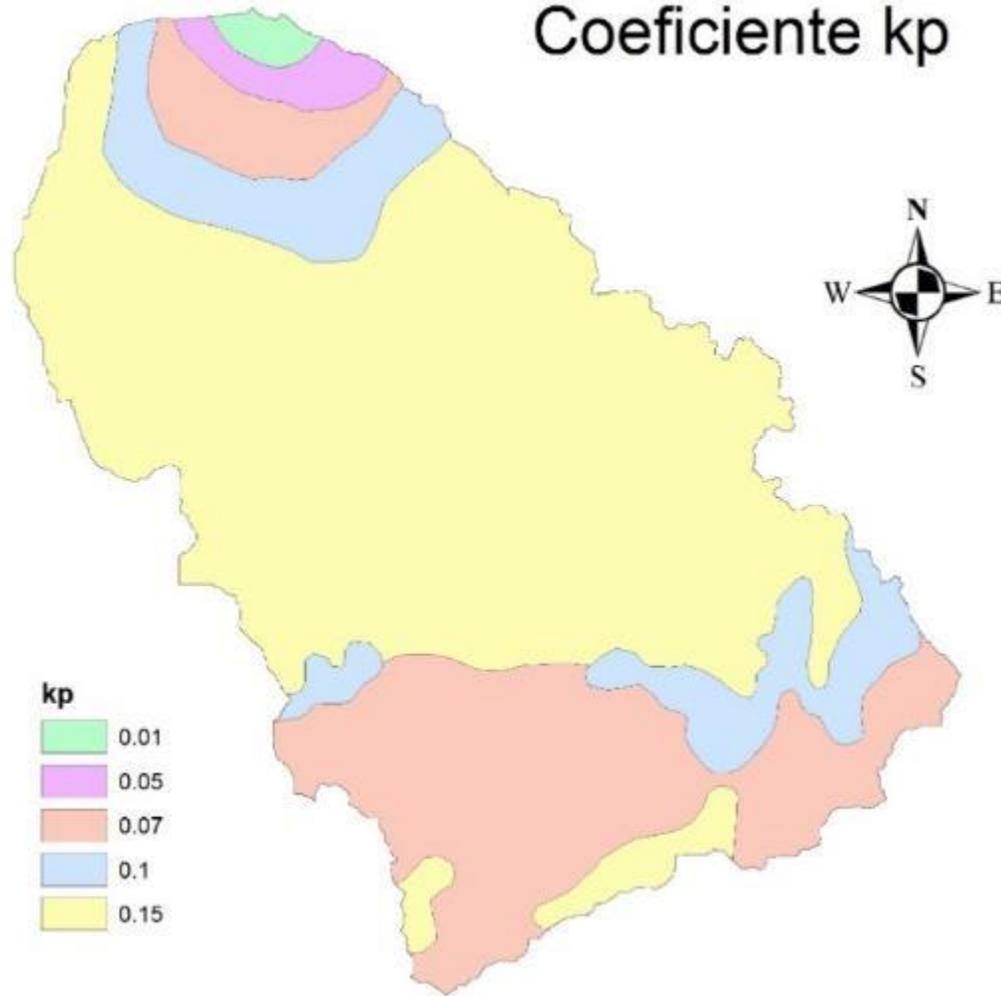
uso de suelo		Tejido Urbano Discontinuo	Granos Básicos	Pastos Cultivados	Pastos Naturales	Cultivos Anuales Asociados con Cultivos	Mosaico de Cultivos y Pastos	Mosaico de Cultivos, Pastos y Vegetación	Plantaciones de Bosques Monoespecífico	Bosque de Galería	Vegetación herbácea natural	Vegetación Arbustiva Baja	Roquedra, lavas	Espacios con Vegetación Escasa	Zonas Quemadas	Praderas Pantanosas	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	Ríos	Lagos, lagunas y lagunetas	Otros Cultivos Irrigados	Café	Árboles Frutales	Caña de Azúcar	Bosque Caducifolio	Bosque Siempre Verdes	Bosques mixtos semi caducifoleos	kc ponderada	
	% de área	0.9	14.3	1.5	11.8	2.8	6.2	3.9	0.1	2.0	7.6	3.9	4.2	1.6	1.6	3.7	0.0	0.6	1.2	0.2	0.7	0.6	6.4	0.4	2.0	21.9	100	
ene	Kc	0.1	1	1	1	1	1	1	0.6	0.6	1	0.7	0	1	1	1.15	1.05	1.15	1.05	1	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6		
	Kc*A%	0.1	14.3	1.5	11.8	2.8	6.2	3.9	0.1	1.2	7.6	2.8	0.0	1.6	1.6	4.2	0.0	0.7	1.3	0.2	0.5	0.4	3.8	0.2	1.2	13.2	0.8	
feb	Kc	0.1	1	1	1	1	1	1	0.6	0.6	1	0.7	0	1	1	1.15	1.05	1.15	1.05	1.05	0.7	0.6	0.8	0.6	0.6	0.6		
	Kc*A%	0.1	14.3	1.5	11.8	2.8	6.2	3.9	0.1	1.2	7.6	2.8	0.0	1.6	1.6	4.2	0.0	0.7	1.3	0.2	0.5	0.4	5.1	0.2	1.2	13.2	0.8	
mar	Kc	0.1	1	1	1	1	1	1	0.6	0.6	1	0.7	0	1	1	1.15	1.05	1.15	1.05	1.05	0.7	0.6	0.9	0.6	0.6	0.6		
	Kc*A%	0.1	14.3	1.5	11.8	2.8	6.2	3.9	0.1	1.2	7.6	2.8	0.0	1.6	1.6	4.2	0.0	0.7	1.3	0.2	0.5	0.4	5.7	0.2	1.2	13.2	0.8	
abr	Kc	0.1	1	1	1	1	1	1	0.6	0.6	1	0.7	0	1	1	1.15	1.05	1.1	1.05	1.05	0.7	0.6	0.9	0.6	0.6	0.6		
	Kc*A%	0.1	14.3	1.5	11.8	2.8	6.2	3.9	0.1	1.2	7.6	2.8	0.0	1.6	1.6	4.2	0.0	0.7	1.3	0.2	0.5	0.4	5.7	0.2	1.2	13.2	0.8	
may	Kc	0.1	0.35	1	1	0.7	1	1	0.6	0.6	1	0.7	0	1	1	1.1	1.05	1.1	1.05	1.05	0.7	0.6	1	0.6	0.6	0.6		
	Kc*A%	0.1	5.0	1.5	11.8	1.9	6.2	3.9	0.1	1.2	7.6	2.8	0.0	1.6	1.6	4.0	0.0	0.7	1.3	0.2	0.5	0.4	6.4	0.2	1.2	13.2	0.7	
jun	Kc	0.1	1	1	1	1	1	1	0.6	0.6	1	0.7	0	1	1	1.1	1.05	1.1	1.05	1.05	0.7	0.6	1	0.6	0.6	0.6		
	Kc*A%	0.1	14.3	1.5	11.8	2.8	6.2	3.9	0.1	1.2	7.6	2.8	0.0	1.6	1.6	4.0	0.0	0.7	1.3	0.2	0.5	0.4	6.4	0.2	1.2	13.2	0.8	
jul	Kc	0.1	1.05	1	1	1.05	1	1	0.6	0.6	1	0.7	0	1	1	1.1	1.05	1.1	1.05	1.05	0.7	0.6	1	0.6	0.6	0.6		
	Kc*A%	0.1	15.0	1.5	11.8	2.9	6.2	3.9	0.1	1.2	7.6	2.8	0.0	1.6	1.6	4.0	0.0	0.7	1.3	0.2	0.5	0.4	6.4	0.2	1.2	13.2	0.8	
ago	Kc	0.1	1.05	1	1	1.05	1.05	1.05	0.6	0.6	1.1	0.7	0	1	1	1.1	1.05	1.1	1.05	1.05	0.7	0.6	1	0.6	0.6	0.6		
	Kc*A%	0.1	15.0	1.5	11.8	2.9	6.5	4.1	0.1	1.2	8.4	2.8	0.0	1.6	1.6	4.0	0.0	0.7	1.3	0.2	0.5	0.4	6.4	0.2	1.2	13.2	0.9	
sep	Kc	0.1	0.6	1.1	1.1	1	1.05	1.05	0.6	0.6	1.1	0.7	0	1	1	1.1	1.05	1.1	1.05	1.05	0.7	0.6	1.05	0.6	0.6	0.6		
	Kc*A%	0.1	8.6	1.6	13.0	2.8	6.5	4.1	0.1	1.2	8.4	2.8	0.0	1.6	1.6	4.0	0.0	0.7	1.3	0.2	0.5	0.4	6.7	0.2	1.2	13.2	0.8	
oct	Kc	0.1	1	1.1	1.1	1	1	1	0.6	0.6	1.1	0.7	0	1	1	1.1	1.05	1.1	1.05	1.05	0.7	0.6	1.15	0.6	0.6	0.6		
	Kc*A%	0.1	14.3	1.6	13.0	2.8	6.2	3.9	0.1	1.2	8.4	2.8	0.0	1.6	1.6	4.0	0.0	0.7	1.3	0.2	0.5	0.4	7.3	0.2	1.2	13.2	0.9	
nov	Kc	0.1	1	1.1	1.1	1	1	1	0.6	0.6	1.1	0.7	0	1	1	1.1	1.05	1.1	1.05	1.05	0.7	0.6	1.15	0.6	0.6	0.6		
	Kc*A%	0.1	14.3	1.6	13.0	2.8	6.2	3.9	0.1	1.2	8.4	2.8	0.0	1.6	1.6	4.0	0.0	0.7	1.3	0.2	0.5	0.4	7.3	0.2	1.2	13.2	0.9	
dic	Kc	0.1	1	1	1	1	1	1	0.6	0.6	1	0.7	0	1	1	1.15	1.05	1.1	1.05	1	0.7	0.6	0.85	0.6	0.6	0.6		
	Kc*A%	0.1	14.3	1.5	11.8	2.8	6.2	3.9	0.1	1.2	7.6	2.8	0.0	1.6	1.6	4.2	0.0	0.7	1.3	0.2	0.5	0.4	5.4	0.2	1.2	13.2	0.8	

Anexo 26 – Coeficientes para el cálculo del método RAS.

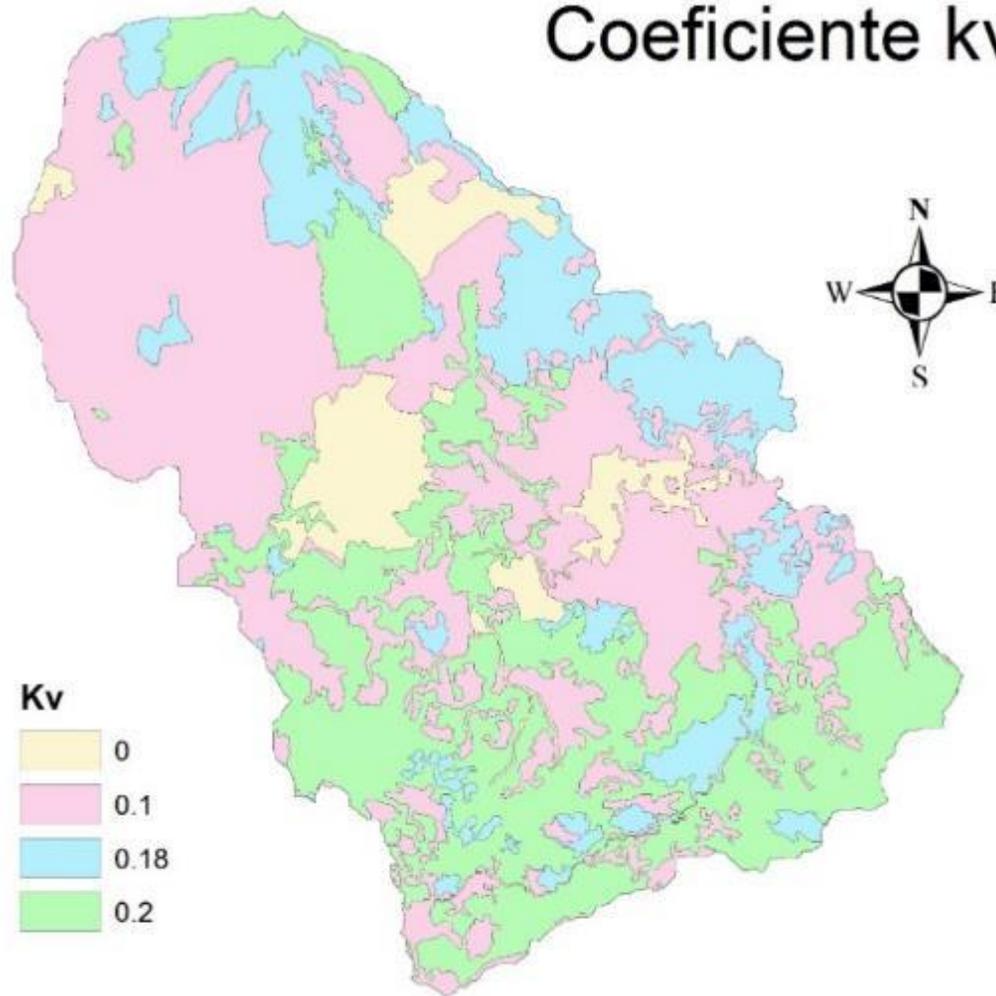
Coeficiente kfc



Coeficiente k_p

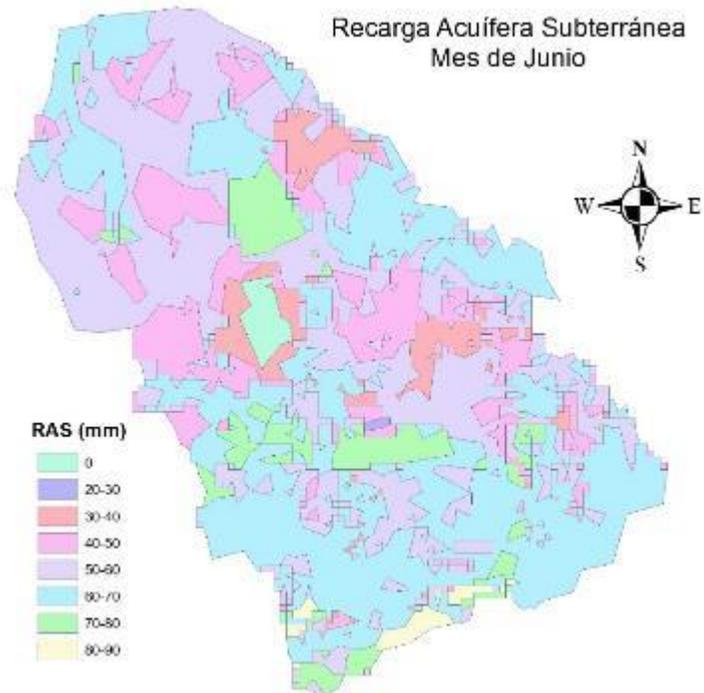
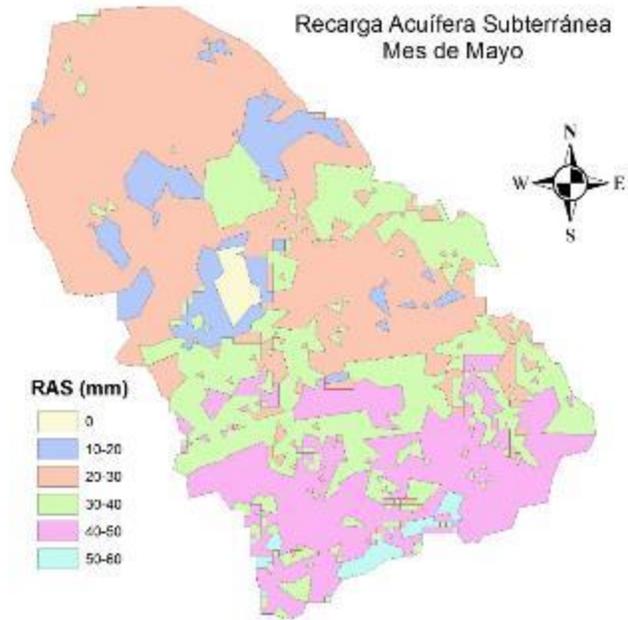


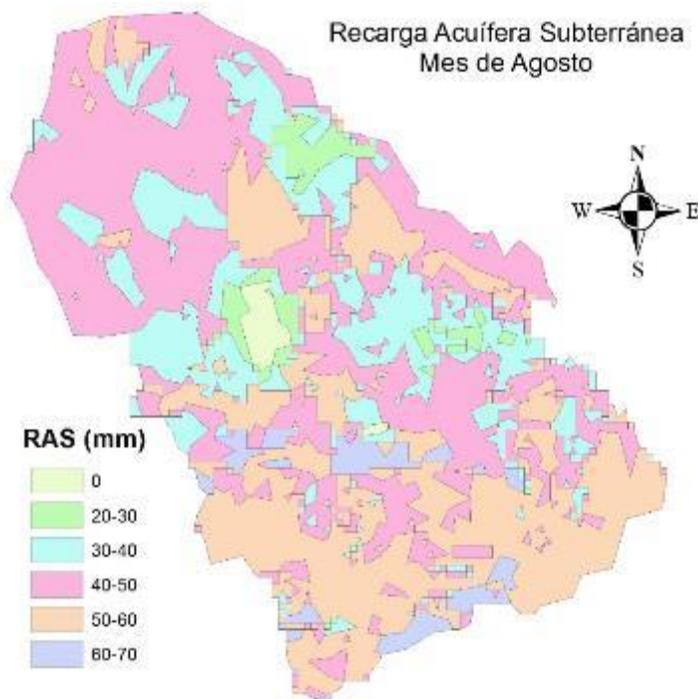
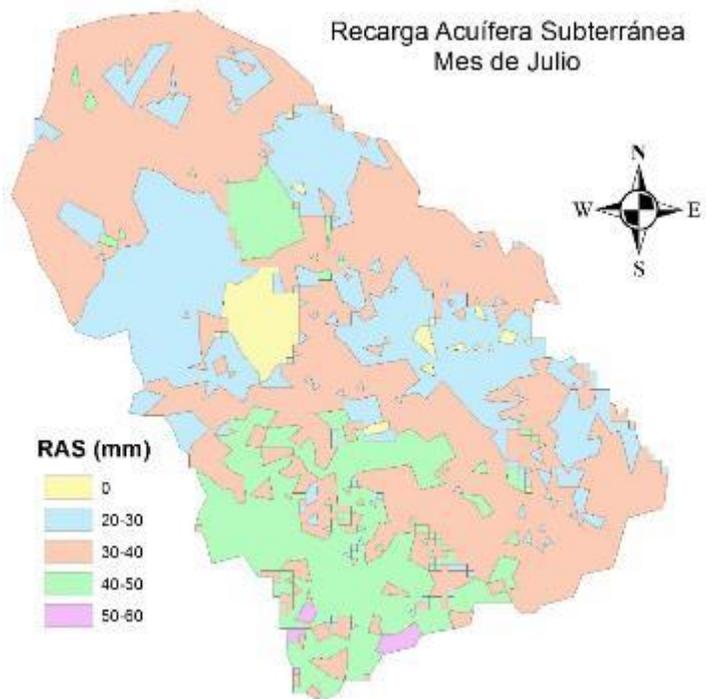
Coeficiente kv



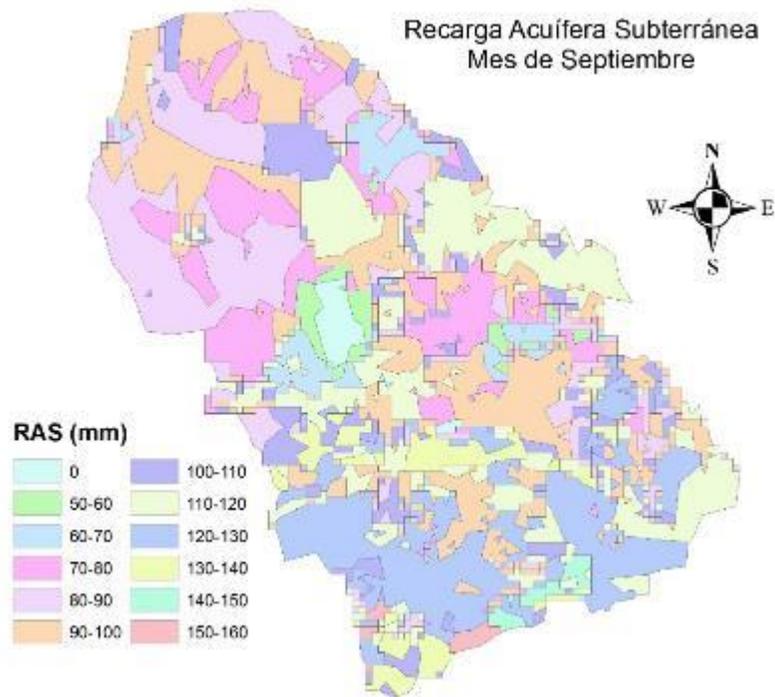
Anexo 27 – Mapas de Recarga Acuífera Subterránea.

$$R = BC * C$$

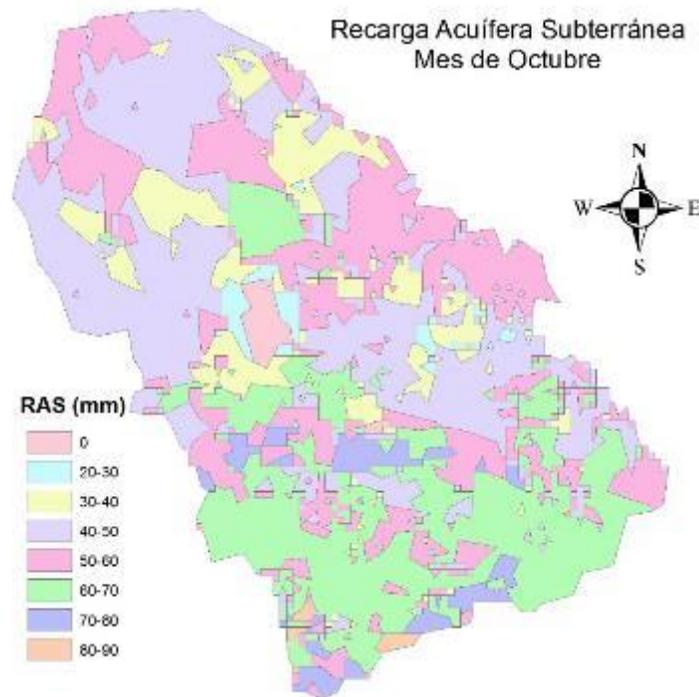




Recarga Acuífera Subterránea
Mes de Septiembre



Recarga Acuífera Subterránea
Mes de Octubre



9. GLOSARIO DE TÉRMINOS.

CONCEPTOS.

Brazo: Corriente que se separa del cauce principal.

Batimetría: Estudio de las profundidades marinas y de los grandes lagos.

Balance Hídrico: es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado.

Cauce fluvial: es una corriente natural de agua que fluye con continuidad. Posee un caudal determinado, rara vez constante a lo largo del año, y desemboca en el mar, en un lago o en otro río, en cuyo caso se denomina afluente. En el cauce se puede distinguir la cabecera, donde nace, el cauce medio y la parte final o desembocadura.

DT-12E: Depresión Tropical 12E, fue la duodécima depresión tropical que se desarrolló durante la temporada de huracanes en el Pacífico de 2011.

Estrato: es cada una de las capas en que se presentan divididos los sedimentos y las rocas en el suelo.

Hidrográma: es un gráfico que muestra la variación en el tiempo de alguna información hidrológica tal como: nivel de agua, caudal, carga de sedimentos, entre otros. Para un río, arroyo o canal, si bien típicamente representa el caudal frente al tiempo.

Índice de Sinuosidad: factor adimensional que representa las unidades de longitud que tiene el cauce de un río por cada unidad de longitud en línea recta.

Limnómetro: es un instrumento que permite registrar y transmitir la medida de la altura de agua o de nieve (en un punto determinado) de un río, una cuenca.

Latitud: es la distancia angular entre la línea ecuatorial (el ecuador), y un punto determinado de la Tierra, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentra dicho punto.

Longitud: expresa la distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y el meridiano que se tome como 0° (es decir el meridiano base) medida a lo largo del paralelo en el que se encuentra dicho punto

Lambert: es una proyección cartográfica cónica. En esencia, la proyección superpone un cono sobre la esfera de la Tierra, con dos paralelos de referencia secantes al globo e intersectándolo. Esto minimiza la distorsión proveniente proyectar una superficie tridimensional a una bidimensional. La distorsión es mínima a lo largo de los paralelos de referencia, y se incrementa fuera de los paralelos elegidos. Como el nombre lo indica, esta proyección es conforme.

Manantial: es una fuente natural de agua que brota de la tierra o entre las rocas.

Morfología: Parte de la geología que estudia el origen y evolución de la superficie terrestre.

Planicie de inundación: es la parte orográfica que contiene un cauce y que puede ser inundada ante una eventual crecida de las aguas de éste.

RAMSAR: Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas, convenio firmado en la ciudad de Ramsar, Irán el 2 de febrero de 1971

Relación de Máximos Caudales Promedios Diarios: Gráfico que presenta en el eje "X" el máximo registro en el hidrograma de caudales promedios diarios de una estación hidrométrica, y en el eje "Y" el máximo registro en el hidrograma de caudales promedios diarios de la estación hidrométrica inmediatamente aguas abajo de la estación presentada en el eje "X".

Sistema de fallas: son las discontinuidades que se forman por fractura en las rocas de la corteza terrestre, a lo largo de la cual ha habido movimiento de uno de los lados respecto del otro.

Substrato: es la capa de suelo debajo de la capa superficial del mismo.

SIGLAS.

BRGSM: Brazo del Río Grande de San Miguel.

DGOA: Dirección General del Observatorio Ambiental

FAO: Organización de Alimentos y Agricultura.

GPS: Global Positioning System (sistema de posicionamiento global) es un sistema global de navegación por satélite que permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto.

LEJ: Laguna El Jocotal.

MARN: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

m.s.n.m.: metros sobre el nivel del mar.

Qpd: Caudal promedio diario.

RGSM: Río Grande de San Miguel.

UNIDADES.

A = área

Ca = centiárea

Ha. = hectárea

km² = Kilómetro cuadrado

m/s = metros sobre segundo

m = metro.

Mm³ = millones de metros cúbicos.

S : segundo.

°C : grado Celsius