



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN
EN RECURSOS ACUÁTICOS
DE NICARAGUA

CIRA/UNAN-MANAGUA



Trabajo de Tesis Para
optar al grado de Máster
en Ciencias del Agua

Título del Trabajo

Análisis regional de frecuencia de precipitaciones anuales para la propuesta de prácticas productivas frente a la amenaza de sequía, parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa

Autor:

Ing. Harvin Joel Bonilla Escoto

Tutor: MSc. Yelba Flores

Asesor: PhD. Augustí Forguet

MSc. Francisco Chavarría

Managua, 23 de marzo 2018

Financiado por: Proyecto Manejo de Agua en Nicaragua y Centroamérica; y el Centro Para la Investigación En Recursos Acuáticos de Nicaragua, CIRA/UNAN-Managua



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN
EN RECURSOS ACUÁTICOS
DE NICARAGUA

CIRA/UNAN-MANAGUA



Trabajo de Tesis Para
optar al grado de Máster
en Ciencias del Agua

Título del Trabajo

Análisis regional de frecuencia de precipitaciones anuales para la propuesta de prácticas productivas frente a la amenaza de sequía, parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa

Autor:

Ing. Harvin Joel Bonilla Escoto

Tutor: MSc. Yelba Flores

Asesor: PhD. Augustí Forguet

MSc. Francisco Chavarría

Managua, 23 de marzo 2018

Financiado por: Proyecto Manejo de Agua en Nicaragua y Centroamérica; y el Centro Para la Investigación En Recursos Acuáticos de Nicaragua, CIRA/UNAN-Managua.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN
EN RECURSOS ACUÁTICOS
DE NICARAGUA
CIRA/UNAN-MANAGUA



Maestría Regional Centroamericana en Ciencias
del Agua con énfasis en Calidad del Agua

2018: "Año de la Internacionalización de la Universidad"

REF.: PMRCA / PGV – 27 / 2018

Acta de Defensa de Tesis de Posgrado No. 27

De acuerdo con lo establecido por la **Ley No. 89 (Ley de Autonomía de las Instituciones de Educación Superior)** y en el **Título VII del Reglamento de Educación Continua y Estudios de Posgrado de la UNAN – Managua**, la Comisión del Programa de Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad del Agua, conformó al **Tribunal Examinador** para el **Acto de Defensa de Tesis de Maestría del Ingeniero Harvin Joel Bonilla Escoto**, estudiante del IV Ciclo con Carnet No. 05065002, con los siguientes miembros:

Dr. Lester Raúl Rocha Molina	Presidente
Dr. Efraín Lucrecio Acuña Espinal	Secretario
Ph.D. Víctor Rogelio Tirado Picado	Vocal

Con el objetivo de evaluar el acto de defensa de la tesis titulada "**Análisis Regional de Frecuencia de precipitaciones anuales para la propuesta de estrategias productivas frente a la amenaza de sequía, parte alta de la cuenca del río Grande de Matagalpa.**"

Siendo las 13:30 horas del día viernes 23 de marzo de 2018, se encuentra reunido el **Tribunal Examinador** en el Aula de la Maestría del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua), habiendo evaluado el documento de tesis escrito y escuchado la presentación y defensa del tema, y recibidas las respuestas a las preguntas formuladas por los miembros de este tribunal presente, le otorgamos la calificación cualitativa de **Aprobado por unanimidad** correspondiendo a la calificación cuantitativa de **Noventa (90)**, con lo cual se dan por concluidos los requisitos para que el **Ingeniero Harvin Joel Bonilla Escoto** obtenga el título de Máster en Ciencias del Agua.

¡A la libertad por la Universidad!

Hospital Monte España 300 metros al norte. Cod. Postal 4598 | Managua, Nicaragua | www.cira.unan.edu.ni
Telf.: ++ (505) 2278 6981 y 82 ext. 8320 | Correo: valeria.delgado@cira.unan.edu.ni, maestria.cienciasdelagua@yahoo.com, ciencias.agua@cira.unan.edu.ni



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN
EN RECURSOS ACUÁTICOS
DE NICARAGUA

CIRA/UNAN-MANAGUA



Maestría Regional Centroamericana en Ciencias
del Agua con énfasis en Calidad del Agua

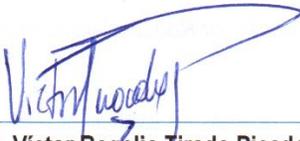
2018: "Año de la Internacionalización de la Universidad"

El Tribunal Examinador asigna las siguientes recomendaciones a ser incorporadas al documento final de tesis (ver documento anexo). Una vez realizadas estas se le concede el Título de **Máster en Ciencias del Agua**.

Leída que fue la presente acta de defensa de tesis del Programa de Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad del Agua, la encontramos conforme, ratificamos y firmamos en la ciudad de Managua, República de Nicaragua, a los veintitrés días del mes de marzo de dos mil dieciocho.


Dr. Lester Raúl Rocha Molina
Presidente


Dr. Efraín Lucrecio Acuña Espinal
Secretario


Ph.D. Víctor Rogelio Tirado Picado
Vocal


MSc. Valeria Delgado Quezada
Coordinadora

Programa de Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del
Agua con énfasis en Calidad del Agua
CIRA/UNAN-Managua



Cc. Archivo

¡A la libertad por la Universidad!

Hospital Monte España 300 metros al norte. Cod. Postal 4598 | Managua, Nicaragua | www.cira.unan.edu.ni
Telf.: ++ (505) 2278 6981 y 82 ext. 8320 | Correo: valeria.delgado@cira.unan.edu.ni, maestria.cienciasdelagua@yahoo.com, ciencias.agua@cira.unan.edu.ni

Dedicatoria

El presente estudio es el resultado de un proceso continuo de aprendizaje, autocrítica y colaboración de muchas personas que me apoyaron, no solo desde el punto de vista técnico – científico, sino de aquel que no puede ser fácilmente medido, pero que coadyuva notablemente a dicho proceso.

Es por ello que quiero dedicar este trabajo primeramente a Dios, el cual me sostuvo de su mano diestra y permitió que todas las piezas del rompecabezas llamado vida se ajustaran hasta llegar al punto en el cual me encuentro; a mi madre, familia y amigos, que siempre estuvieron dándome ánimos y apoyándome en todo momento.

De igual forma, dedico el presente documento a mi padre, que, aunque ya no está conmigo, sus enseñanzas siempre vivirán conmigo; a mi esposa, por su amor, comprensión y consejos, su esmero y sobre todo por reglarme a los seres que cambiaron mi vida, mis hijas.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer al Programa Centroamericano de Redes de Manejo de Agua (CARA) por la beca que me fue otorgada para realizar mis estudios de postgrado, así como, a la coordinación de la maestría Ciencias del Agua, con énfasis en calidad de agua del Centro de Investigación de los Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA – UNAN Managua). Gracias por la confianza y por todo su apoyo.

Agradecimiento especial a la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y la Facultad Regional Multidisciplinaria de Matagalpa (FAREM Matagalpa), en particular al PhD Jairo Rojas por las gestiones realizadas e involucramiento con la recopilación de datos del presente estudio.

También, un reconocimiento a las diferentes instituciones del estado que me brindaron información tales como, el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA) y Autoridad Nacional del Agua (ANA).

De igual manera, quiero agradecer a mi tutora, MSc. Yelba Flores por sus comentarios oportunos, sus enseñanzas y su tiempo. Asimismo, mi gratitud eterna para los PhD Agustí Forguet y Francisco Chavarría, que me introdujeron a un mundo nuevo, pero maravilloso: R, modelación y sequía; el presente estudio es fruto de sus consejos e instrucciones.

Por último, pero no menos importante, mi gratitud hacia mis compañeros, de los cuales aprendí a través de la convivencia diaria durante dos años, empapándome de sus experiencias y conocimientos.

Índice General

I.	CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1	ÁREA DE ESTUDIO	2
1.1.1	Ubicación	2
1.1.2	Relieve y clima	2
1.1.3	Hidrografía e hidrología	4
1.1.4	Geología.....	5
1.1.5	Población	8
1.1.6	Uso de suelo y sistemas de producción.....	8
1.2	ANTECEDENTES.....	10
1.3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.3.1	Caracterización del problema	12
1.3.2	Delimitación del problema	12
1.3.3	Formulación del problema	13
1.3.4	Sistematización del problema	13
1.4	JUSTIFICACIÓN.....	13
1.5	OBJETIVOS.....	15
1.5.1	General	15
1.5.2	Específicos	15
II.	CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	16
2.1	PRECIPITACIÓN ANUAL	16
2.1.1	Precipitación en el ciclo del agua.....	16
2.1.2	Distribución de las precipitaciones anuales	18
2.1.3	Factores que determinan la distribución de las precipitaciones	21
2.2	SEQUÍA	22
2.2.1	Tipos de sequías	22
2.2.2	Factores que conducen a la sequía	23
2.2.3	Efectos de la sequía	23
2.3	PERIODOS DE RETORNO Y L-MOMENTOS.....	25
2.3.1	Periodo de retorno.....	25

2.3.2 Hidrología probabilística y L-Momentos.....	25
2.3.3 Ventajas de L-Momentos.....	26
2.4 ESTRATEGIAS PRODUCTIVAS.....	27
2.4.1 Riesgo de sequía y adaptación en la producción de cultivos de cosecha	27
2.4.2 Los mecanismos de manejo de riesgo.....	28
III. CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	29
3.1 TIPO DE ESTUDIO.....	29
3.2 UNIVERSO Y MUESTRA.....	29
3.3. VARIABLES E INDICADORES.....	31
3.4 TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS E INFORMACIÓN.....	31
3.6 PROCEDIMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	32
3.7 PLAN DE TABULACIÓN Y ANÁLISIS.....	33
3.7.1 Sequía.....	33
3.7.2 Períodos de retorno de sequía: Modelo análisis regional de frecuencia basado en L-Momentos.....	44
3.7.3 Prácticas productivas para la mitigación de la sequía.....	52
IV. CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
4.1 COMPORTAMIENTO DE LA SEQUÍA.....	55
4.1.1. Meteorológica.....	55
4.1.2. Sequía agrícola.....	65
4.1.3. Sequía hidrométrica.....	72
4.2. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍA: ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIA.....	76
4.2.1. Filtrado primario de las observaciones.....	76
4.2.2. Identificación de regiones homogéneas.....	81
4.2.3. Elección de distribución de frecuencia.....	84
4.2.4. Estimación de cuantiles de frecuencia.....	87
4.2.5. Mapeo.....	89
4.3. ESTRATEGIAS PRODUCTIVAS FRENTE A LA SEQUÍA.....	100
4.3.1. Cultivos.....	100

4.3.2. Suelos	103
4.3.3. Necesidades de riego	107
4.3.4. Infraestructura	118
4.3.5. Prevención	120
V. CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	123
VI. CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES	125
VII. CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA	126
VIII. CAPÍTULO 8. ANEXOS	135
Anexo 1. Histograma de la precipitación media anual de las estaciones analizadas.	135
Anexo 2. Matriz de operacionalización de variables e indicadores (MOVI).	136
Anexo 3. Pruebas de infiltración (Gráficas y datos)	138
Anexo 4. Datos resultantes del balance hídrico de suelos	144
Anexo 5. Funciones de distribuciones utilizadas en el Análisis Regional de Frecuencia.....	146
Anexo 6. Script para implementación en R	148
Anexo 7. Validación cruzada de la interpolación de las precipitaciones medias anuales por el método de Kriging Ordinario (KO)	178
Anexo 8. Obras.....	179
8.1 Tanque de ferrocemento.....	179
8.2 Reservorios de ladera.....	184
8.3 Represas pequeñas aprovechando cárcavas	184
8.4 Zanjas de almacenamiento revestidas.....	185
Anexo 9. Fotos	186

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio.	3
Figura 2. Geología del área de estudio.	7
Figura 3. Uso de suelo del área de estudio.	9
Figura 4. Ciclo del agua.	17
Figura 5. Precipitación Media Anual de la República de Nicaragua.	20
Figura 6. Representación del Método de Seepage.	43
Figura 7. Diagrama de flujo del análisis regional de frecuencia de precipitación. ...	44
Figura 8. Boxplot de Precipitación Media Anual de las estaciones en estudio.	56
Figura 9. Boxplot del comportamiento de Precipitación Mensual promedio de las Estaciones.	59
Figura 10. Índice de Desviación de Precipitación (IDP) de las estaciones Labranza, Reyna, Tierra Azul, Raúl González y San Dionisio.	59
Figura 11. Índice de Desviación de Precipitación (IDP) de las estaciones Esquipulas, San Ramón, Terrabona y Muy muy.	60
Figura 12. Índice de Desviación de Precipitación (IDP) de las estaciones Majada, Cacao de los Suárez, Sébaco, Darío y Mascota.	60
Figura 13. Índice de Desviación de Precipitación (IDP) de las estaciones Aranjuez, Corneta, Quebrada honda, Santa Lastenia y Aguas Zarcas.	61
Figura 14. Mapa de Evapotranspiración Potencial Media Anual del área de estudio.	63
Figura 15. Índice de Desviación de Evapotranspiración Potencial Anual (IDET) de las estaciones Esquipulas, San Ramón, Muy muy y Raúl González.	64
Figura 16. Triángulo textural de suelo según USDA con los datos levantados en campo.	65
Figura 17. Humedad de suelo final (HSf) del punto denominado Apompuá.	67
Figura 18. Humedad de suelo final (HSf) del punto denominado Aranjuez.	69
Figura 19. Humedad de suelo final (HSf) del punto denominado Zapote.	69
Figura 20. Humedad de suelo final (HSf) del punto denominado Guayacán.	70

Figura 21. Humedad de suelo final (HSf) del punto denominado Jucuapa..	71
Figura 22. Caudal de la estación hidrométrica Grande de Matagalpa en Sébaco y Precipitación de la estación pluviométrica de Sébaco.....	73
Figura 23. Caudal de la hidrométrica Grande de Matagalpa en Darío y Precipitación de la estación pluviométrica de Darío..	73
Figura 24. Curva de Caudales Clasificados de la estación Grande de Matagalpa en Sébaco..	74
Figura 25. Curva de Caudales Clasificados de la estación Grande de Matagalpa en Darío.....	75
Figura 26. Cociente L-Momentos iniciales de las estaciones en estudio..	78
Figura 27. Cocientes L-Momentos de las estaciones previamente filtradas.	80
Figura 28. Clúster de las estaciones basado en sus descriptores físicos.	83
Figura 29. Diagrama de L-Momentos de la región del Centro..	85
Figura 30. Diagrama de L-Momentos de la región del Valle.....	86
Figura 31. Representación gráfica de las estimaciones regionales, región Centro.	88
Figura 32. Representación gráfica de las estimaciones regionales, región Valle. .	89
Figura 33. Comportamiento del Coeficiente de Variación Lineal (LCV) frente a la Precipitación Media Anual.....	90
Figura 34. Semivariograma omnidireccional con ajuste al modelo teórico esférico.	92
Figura 35. Mapa de Precipitación Media Anual del área de estudio estimado a través del método de Kriging Ordinario.....	93
Figura 36. Mapa de período de retorno asociado a una disminución del 15 % de la Precipitación Media Anual Histórica.....	95
Figura 37. Mapa de período de retorno asociado a una disminución del 30 % de la Precipitación Media Anual Histórica.....	97
Figura 38. Mapa de período de retorno asociado a una disminución del 45 % de la Precipitación Media Anual Histórica.....	99
Figura 39. Mapa de uso potencial del suelo del área de estudio.....	106

Figura 40. Necesidades hídricas del cultivo de maíz en la subcuenca parte alta del Río Grande de Matagalpa.....	108
Figura 41. Necesidades hídricas del cultivo del frijol en la subcuenca parte alta del Río Grande de Matagalpa.....	110
Figura 42. Necesidades hídricas del cultivo del café en la subcuenca parte alta del Río Grande de Matagalpa.....	111
Figura 43. Mapa de isopiezas y comportamiento del flujo subterráneo en el valle de Sébaco.	113
Figura 44. Mapa de ubicación de Manantiales en el área de estudio.	114
Figura 45. Componentes de la planificación.	122

Índice de cuadros

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas del área de estudio.....	29
Cuadro 2. Estaciones hidrométricas del área de estudio	30
Cuadro 3. Ubicación de pruebas de infiltración	30
Cuadro 4. Clasificación de sequía meteorológica	33
Cuadro 5. Fracción que infiltra por efecto de la pendiente	36
Cuadro 6. Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal.....	37
Cuadro 7. Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal.....	38
Cuadro 8. Valor crítico de discordancia.....	46
Cuadro 9. Valor crítico de heterogeneidad	48
Cuadro 10. Datos generales de las estaciones utilizadas en el presente estudio..	55
Cuadro 11. Valores de Capacidad de Campo, Punto de Marchitez Permanente y Densidad Aparente del Suelo de las localidades en estudio	66
Cuadro 12. Datos obtenidos de pruebas Seepage.....	76
Cuadro 13. Valores de los cocientes L-Momentos iniciales de las estaciones	77
Cuadro 14. Valores de Discordancia iniciales (Di) de las estaciones en estudio ...	78
Cuadro 15. Valores de los cocientes L-Momentos de las estaciones	79
Cuadro 16. Valores de Discordancia Di de las estaciones	80
Cuadro 17. Descriptores físicos de las estaciones	81

Cuadro 18. Regiones homogéneas.....	83
Cuadro 19. Valor estadístico Zdist para las diferentes distribuciones de la región del Centro	84
Cuadro 20. Valor estadístico Zdist para las diferentes distribuciones de la región del Valle	87
Cuadro 21. Caudales de manantiales de la subcuenca	115
Cuadro 22. Caudales de Pozos Inventariados en la subcuenca	116

Abreviaciones y unidades de medida

ANA	Autoridad Nacional del Agua
ARF-LM lineales	Análisis regional de frecuencias a través de momentos lineales
CC o cc	Capacidad de campo
CIAT	The International Center for Tropical Agriculture
COSUDE	Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación
ENSO	El Niño – Oscilación del Sur por sus siglas en inglés, El Niño - Southern Oscillation
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GRUN	Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional
IDP	Índice de desviación de la precipitación
INAFOR	Instituto Nacional Forestal
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales
INIDE	Instituto Nacional de Información de Desarrollo
INTA	Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria
km ²	Kilómetro cuadrado
L – CV	Coeficiente de variación según los momentos lineales
m ³ /s	Metros cúbicos por segundo
MAE	Error medio absoluto por sus siglas en inglés, mean absolute

error	
MAG	Ministerio Agropecuario
MAGFOR	Ministerio Agropecuario y Forestal
MARENA	Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales
MBE	Sesgo medio por sus siglas en inglés, mean bias error
ml	Mililitros
mm/h:	Milímetro por hora
mm:	Milímetro
msnm	Metros sobre el nivel del mar
PMA	Precipitación media anual
PMP o pmp	Punto de marchitez permanente
QGIS	Quantum GIS (Sistema de información geográfica por sus siglas en inglés, geographic information system)
RMSE	Raíz del error cuadrático medio por sus siglas en inglés, root mean square error
UCOSD	Unión de Campesinos Organizados de la cuenca de San Dionisio
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

Resumen

Autor: Ing. Harvin Joel Bonilla Escoto

Título: Análisis regional de frecuencia de precipitaciones anuales para la propuesta de prácticas productivas frente a la amenaza de sequía, parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa.

Año de publicación: 2018

El presente estudio tiene por objetivo general desarrollar el análisis regional de frecuencia de precipitaciones anuales para la propuesta de prácticas productivas frente a la amenaza de sequía, parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa. Los resultados de estudio se dividieron en 3 partes fundamentales: La caracterización de la sequía en la subcuenca en sus diferentes tipos, la determinación de períodos de retorno de sequía, basados en el análisis regional de frecuencias de la precipitación anual y la propuesta de prácticas productivas con base en los períodos de retorno de sequía en la parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa. Los resultados indican que, a lo largo de los períodos registrados, por las diferentes estaciones de precipitación de la Subcuenca, han ocurrido un total de 10 sequías meteorológicas, 6 de las cuales se manifestaron en más de 3 estaciones con clasificación de “sequía severa” (>45 %). Las sequías agrícolas en los meses de septiembre y octubre se correlacionan con sequías meteorológicas moderadas y severas a nivel anual. Las áreas más susceptibles a la amenaza se localizan en la parte noroeste y oeste de la subcuenca. Existe un comportamiento altamente heterogéneo de la sequía reflejado en el ajuste a diferentes distribuciones de las estaciones analizadas. Se determinó que los períodos de retorno aumentan a medida que aumenta la longitud y altitud. Sequías asociadas a la reducción de la precipitación media anual por el orden del 45 % poseen períodos de retorno que varían desde 5 años en los alrededores de la comunidad Quebrada honda hasta más de 50 años en la parte este de la subcuenca. Las prácticas productivas son imprescindibles para lograr la adaptación ante la amenaza de sequía en el sector, particularmente en zonas con mayor recurrencia del fenómeno, por lo que propone estrategias tales como el uso de variedades resistentes o tolerantes al fenómeno, obras de conservación de agua y suelo, tecnologías de optimización del recurso, recolección de agua y la planificación de las acciones pertinentes en subconjunto con todos los actores que intervienen en el sector dentro de la subcuenca.

Palabras Clave: Sequía, Análisis regional de frecuencia, L-Momentos, Prácticas productivas, Períodos de retorno.

I. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Junto a sus afluentes el Río Grande de Matagalpa ha sido el entorno físico donde el departamento se ha desarrollado a lo largo de su historia. En las últimas décadas, el aumento de la población, la deforestación y las prácticas agropecuarias poco racionales con el medio, en conjunto con fenómenos externos a la cuenca, como lo es el calentamiento global, han ejercido presión sobre estas áreas pertenecientes al cauce principal de los ríos.

Esta área presenta con frecuencia sequías que causan daños cuantiosos y sin la posibilidad de mitigar sus efectos a corto, mediano y largo plazo, afectando principalmente a sectores que son dependientes de las actividades agropecuarias.

Ante esto, es necesario contar con las herramientas necesarias para la toma de decisiones para predecir eventos de sequía y buscar medidas de adaptación ante sus efectos, siendo importante el estudio de precipitación enfatizado en la recurrencia de sequías.

Existen diversas aproximaciones destinadas a conocer y describir el fenómeno de la sequía, desde indicadores de diversa resolución espacial y temporal a modelos de simulación complejos. Estos modelos están orientados a apoyar los sistemas de alerta temprana de sequías, ayudando a disminuir la incertidumbre asociada al fenómeno (UNESCO, 2006).

El análisis de frecuencias es un conjunto de procedimientos utilizados para predecir el comportamiento futuro de la variable en un sitio particular, a partir de la información histórica existente; es decir, relacionar su magnitud con la frecuencia de ocurrencia o su periodo de retorno T asociado (Kite, 1977).

Este método según Hosking y Wallis (1997) resuelve los problemas de reducida disponibilidad de datos de las series pluviométricas, alta variabilidad temporal y espacial, así como factores externos (ENSO, cambio climático), "paliando la carencia en el tiempo con la abundancia en el espacio".

El presente estudio propone prácticas productivas frente a la amenaza de sequía, en la parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa a través del método de

Análisis regional de frecuencia de precipitaciones anuales utilizando el método de L-Momentos, a fin de contribuir con la planeación oportuna y eficaz en el territorio de dicha amenaza.

El estudio estructura sus resultados en tres etapas, donde en primera instancia se describe la amenaza como tal; posteriormente, se elaboraron un conjunto de mapas con períodos de retornos de sequía asociados a diferentes magnitudes de sequía meteorológica; para finalmente, proponer un conjunto de prácticas pertinentes para los resultados encontrados.

1.1 ÁREA DE ESTUDIO

1.1.1 Ubicación

El área de estudio se encuentra inserta en la parte occidental del departamento de Matagalpa. Posee una extensión aproximada de 2,145.68 km². Comprende los municipios del departamento de Matagalpa: Ciudad de Matagalpa, Sébaco, Darío, Terrabona, San Dionisio, Esquipulas, y San José de los Remates (Boaco).

1.1.2 Relieve y clima

La parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa está enclavada en la cadena montañosa central del país, que se caracteriza por poseer altas montañas, colinas escarpadas, planicies seccionadas y valles encajonados.

En la zona de estudio sobresalen alturas como los cerros Tijerina (913.75 m), en cuya parte superior se observan hileras de pinos que crecen sobre el filo rocoso, Palcila (1,478 m), el Picacho (1,750 m) y San Salvador (1,247 m). Al sur de la ciudad de Matagalpa se localiza la montaña de Apante, con su pico culminante de Buena Vista (1,442 m). La parte alta de la cuenca al norte presenta clima de Sabana Tropical de Altura (Awh).

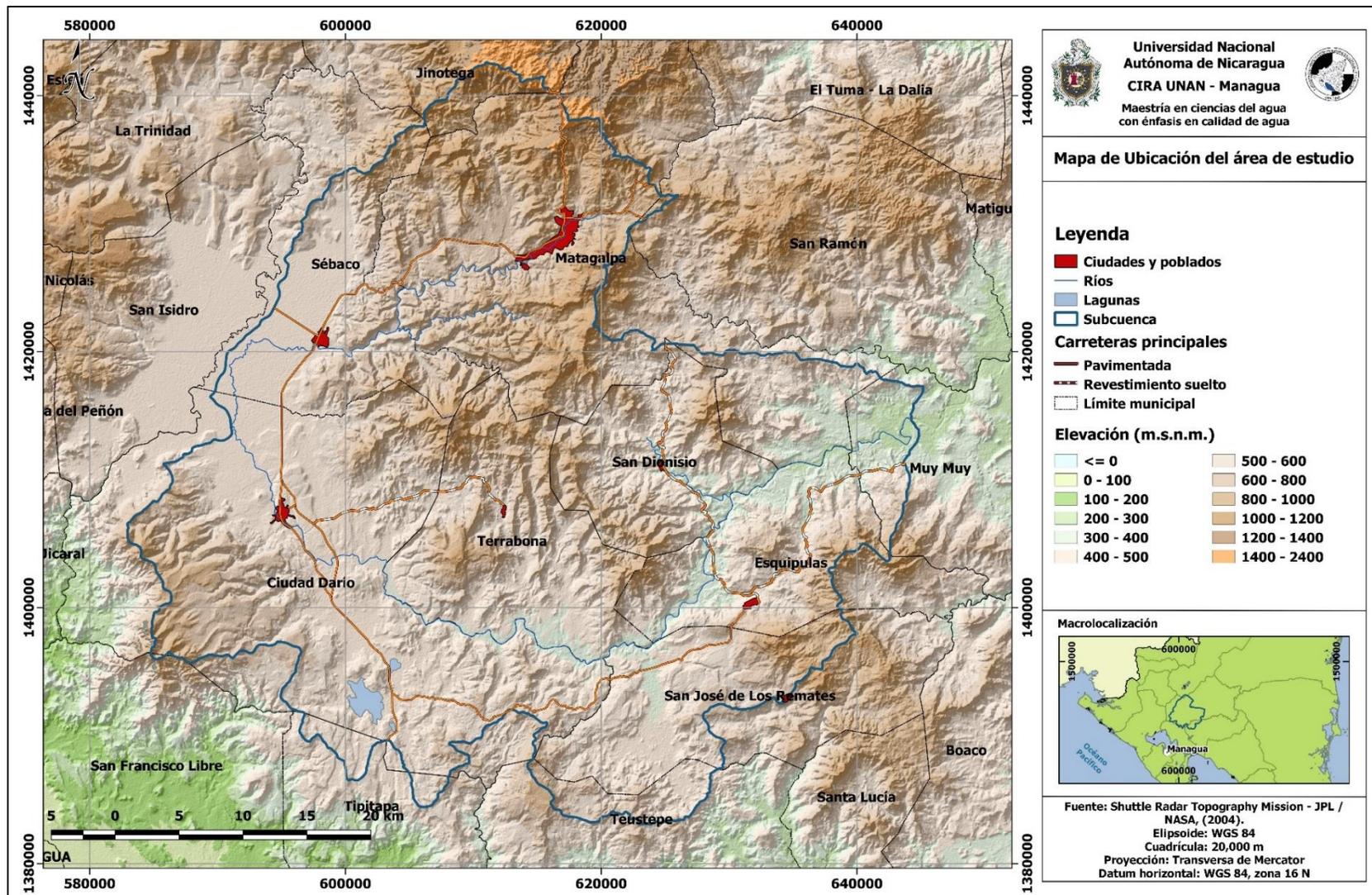


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

En el área media del sistema, se presenta una zona bastante seca, condicionada por la presencia de una zona hundida del valle de Sébaco, donde la zona elevada representa un obstáculo para las lluvias provenientes de la costa Caribe (Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales - MARENA, 2010) (ver figura 1).

1.1.3 Hidrografía e hidrología

La parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa está subdividida en 3 sistemas: Grande de Matagalpa, Grande de Matagalpa-Cálico y laguna de Moyúas-playitas. Entre los principales afluentes de la subcuenca se citan el río Jucuapa (16.39 km de longitud), el cual, nace de las faldas del cerro Peña Blanca, al suroeste (SO) del mismo; y el río Cálico (12.02 km de longitud), que nace del costado sureste (SE) del cerro El Castillo.

Ambos ríos son alimentados por un conjunto de ríos, que en su mayoría son intermitentes, por lo que, solo es posible observar caudal durante la época lluviosa.

El Río Grande de Matagalpa, en términos generales, describe un recorrido en forma de "C", bordeando el ramal de la cordillera Dariense, siendo su longitud de 146.34 km. Nace de la confluencia de los ríos Molino norte y San Francisco, al noreste de la ciudad de Matagalpa. Luego, transita hacia las ciudades de Sébaco y Darío, girando con rumbo este hacia los municipios de Esquipulas y Muy Muy (ver figura 1).

El perímetro de la subcuenca es de 272.75 km, estimándose un tiempo de concentración por el método de Kirpich de 784.76 minutos, equivalente a 13.1 horas.

Posee un índice de compacidad de 1.65, por lo que la cuenca se clasifica como oval oblonga a rectangular oblonga, con tendencia a no concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento en su punto exutorio.

1.1.4 Geología

Las rocas volcánicas terciarias formadas en el interior de Nicaragua han sido generalmente divididas en tres principales unidades (Weyl, 1980): El grupo Matagalpa (Oligoceno – Mioceno) y los grupos Coyol inferior y superior (Mioceno). Toda la actividad volcánica se estima que data entre 25 y 17 Ma (Elming y Rasmussen, 1997).

La mayor parte de la subcuenca está sobre rocas volcánicas constituidas según Hodgson (2000), por lavas andesíticas aglomerados con transición, desde andesitas ignimbríticas a ignimbrita dacítica y brecha aglomerado, denominadas formación Grupo Coyol Inferior / N (2-1)-3C1. La edad de dicha formación es variable. De acuerdo con Hodgson (2000), muestras recolectadas al este (E) de Sébaco indican una edad de 14.6 ± 0.2 Ma.

Por su parte, el grupo del Coyol Superior / N2-C2 está subdividido en tres formaciones. Las dos formaciones inferiores, son similares al coyol inferior, en el sentido de que existe una transición gradual de rocas básicas y aglomerado a ignimbrita intermedia, pasando progresivamente a ignimbrita más ácida en su nivel superior (representa la sucesión ordenada de básica–aglomerado a ácida).

La formación superior de lava y aglomerado, interrumpe la sucesión estratigráfica normal, ya que con ella sería el comienzo de otra nueva secuencia volcánica. Dataciones radiométricas, determinaron una edad de Mioceno – Plioceno medio, para el grupo de Coyol superior. El grupo está separado del Coyol inferior por una ligera discordancia angular (Hodgson, 2000). En la sub cuenca se localiza esta formación tanto en la zona suroeste (SE), como en la zona norte y central de la misma.

Según Hodgson (2000), McBirney 1965, describe el grupo Matagalpa / P3-N (2-1) mt donde predomina rocas autobrechas andesíticas piroxénicas, lava y lahar en bloques. Debido a la porosidad de la roca y a la abundancia de lluvia, la meteorización es profunda. La alteración hidrotermal ha reducido las rocas a una arcilla blanca amarillenta. Dacitas y dacitas laminares son abundantes y mejor conservadas.

Varios tapones riolíticos hidrotermalmente alterados introduce la serie, y podrían corresponder a la forma cónica o pitón Peleano. La edad del grupo Matagalpa se extiende desde el Eoceno superior hasta el mioceno medio.

En la sub cuenca el grupo Matagalpa se localiza predominantemente en la parte sureste (SE) de la misma, en las zonas adyacentes a los municipios de Esquipulas, Muy Muy y San José de los Remates.

Por otro lado, en la sub cuenca se puede apreciar ciertas áreas con intrusivos (V4) conformados según el ya extinto Servicio Geológico Nacional (1987), por Gabrodioritas, gabros y diabasas. Se localizan al costado oeste de la ciudad de Darío, así como al este del municipio de San Dionisio.

Por último, se puede apreciar áreas con formaciones cuaternarias conformadas por sedimentos recientes (Qiv) y sedimentos consolidados y recientes (Qiii-iv), ubicados principalmente sobre pequeños valles intramontanos (ver figura 2).

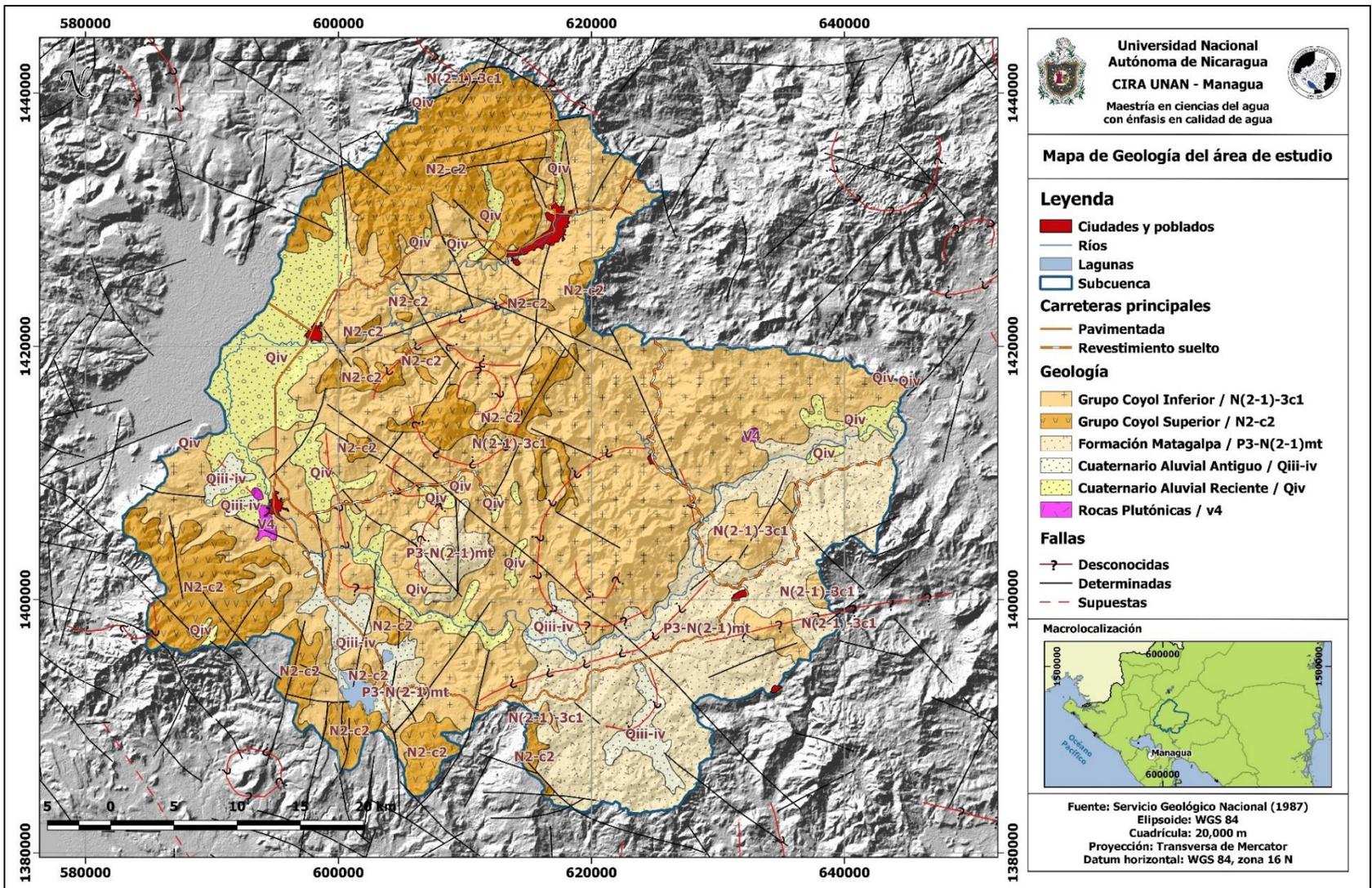


Figura 2. Geología del área de estudio.

1.1.5 Población

Según el CENSO del 2005 (INIDE, 2005) la población del área estudio es aproximadamente de 272,411 habitantes proyectados para el 2008. En su mayoría, la población es rural (62.5 %), aunque municipios como Sébaco (62.88 %) y la ciudad de Matagalpa (56.15 %) tienen un carácter urbano.

1.1.6 Uso de suelo y sistemas de producción

La actividad agropecuaria es la actividad económica fundamental de la zona de estudio, desarrollándose una agricultura tradicional y una ganadería extensiva.

El 37.26 % del área de la subcuenca, está cubierta por vegetación arbustiva, seguido por pastos (36.73 %), ambos localizado sobre todo en las partes bajas de la misma. En las partes altas predominan los bosques latifoliados densos, así como las plantaciones de cultivos permanentes, tales como el café (3.04 % y 3.09 % respectivamente).

Los cultivos anuales tales como el arroz y las hortalizas, se cultivan sobre todo en el valle de Sébaco, mientras, cultivos anuales como el maíz y el frijol se cultivan en la parte este de la subcuenca, en los municipios de San Dionisio y Esquipulas. En subconjunto representan el 4.22 % del área de la subcuenca (ver figura 3).

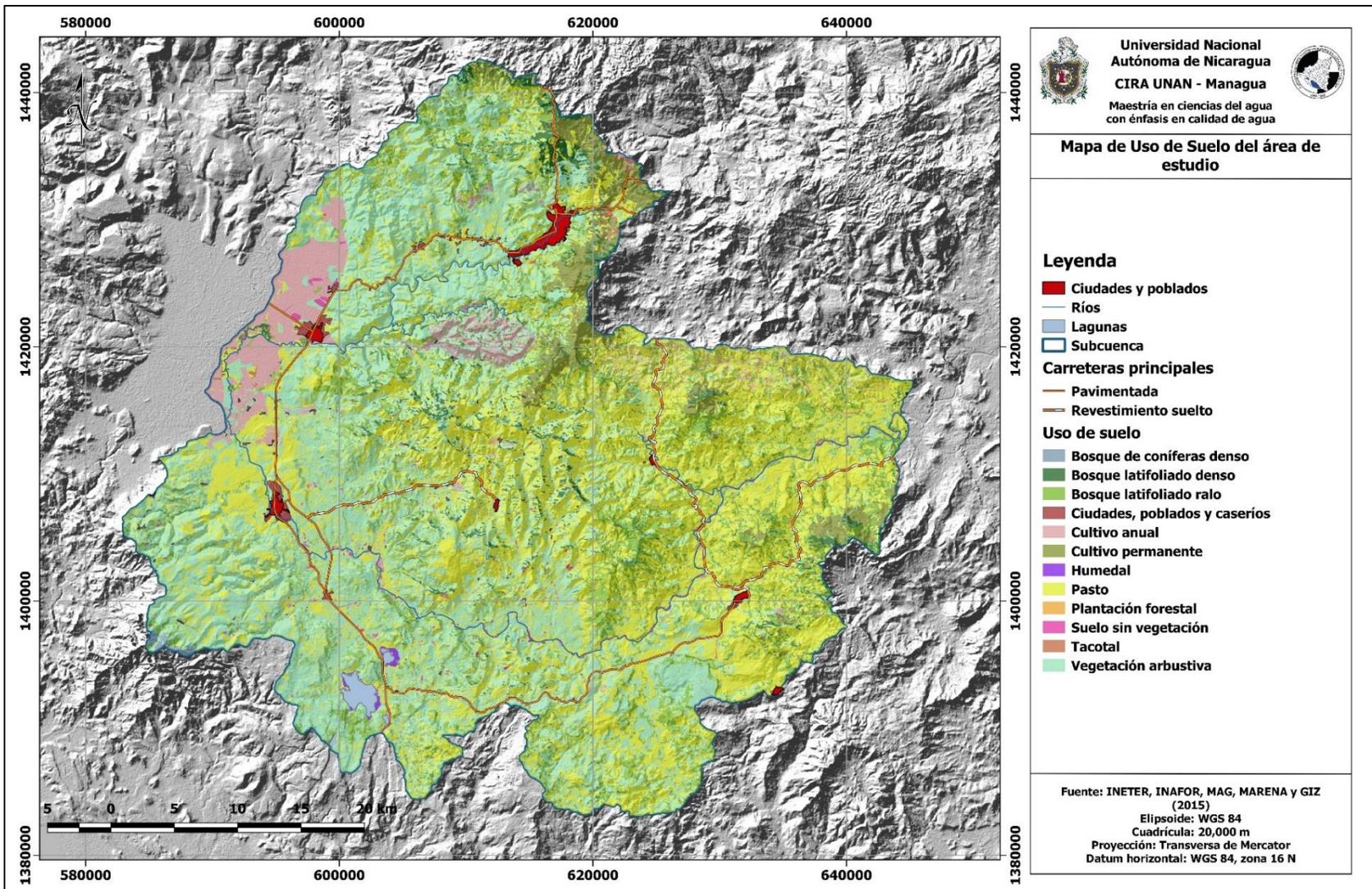


Figura 3. Uso de suelo del área de estudio.

1.2 ANTECEDENTES

Se ha demostrado en los últimos años, que los métodos convencionales usados por más de 80 años para el ajuste de modelos de probabilidad a datos observados, en especial con registros de corta duración y presencia de valores considerados atípicos provenientes de distribuciones altamente asimétricas no son los más adecuados. Estos métodos tan ampliamente extendidos, como el de los momentos y máxima verosimilitud, que gozan de amplia difusión en el diseño hidrológico, presentan serios problemas de sesgo en las estimaciones de períodos de retorno y cuantiles con registros cortos (Núñez, Verbist, Ramírez y Hallack, 2010).

El Análisis Regional de Frecuencias, en particular del tipo denominado Índice de Avenida, basado en la aplicación de los L-Momentos (ARF-LM), tiene su origen en el estudio de crecidas, siendo utilizado en mayor medida en el análisis de estos eventos y el de precipitaciones máximas (Loucks y Beek, 2005; Schaefer, Barker, Taylor y Wallis, 2006; Schaefer, Barker, Taylor y Wallis, 2007; Guelman y Cunha, 2002; Norbiato, Borga, Sangati y Zanon, 2007).

Los L-Momentos constituyen un sistema alternativo al método tradicional (momentos convencionales), para describir las formas de las funciones de distribución y surgen de combinaciones lineales de los momentos ponderados probabilísticamente (MPP) introducidos por Greenwood *et al.*, (1979) citado por Hosking y Wallis (1997).

En el caso específico de las sequías, esta metodología se ha aplicado al estudio de las sequías meteorológicas e hidrológicas, tal como en la elaboración del Atlas de Sequía de EE.UU. (IWR, 1995, citado por Núñez *et al.*, 2010), análisis de sequías en el noroeste de México (Hallack-Alegría y Watkins, 2007), análisis de sequías en Turquía (Yurekli y Anli, 2008) y en comparación con otras alternativas de regionalización en el estudio de sequías en Europa (Tallaksen e Hisdal, 1999), así como en la parte norte de Chile (Núñez *et al.*, 2010).

No se registran estudios y/o documentos técnicos usando la metodología de L-Momentos en el país. No obstante, estudios relacionados con la sequía en el país

han sido llevados a cabo por INETER (s.f.) utilizando el método de deciles en la región del Pacífico y Central, concluyendo que las tierras altas del interior son menos afectadas por la sequía que la región del Pacífico. Así mismo, en el 2005 Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) y Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) implementaron la metodología de desviación de precipitación anual en el municipio de Tipitapa.

Por su parte, diversos documentos han sido elaborados por parte del gobierno de Nicaragua a nivel de país con el fin proponer medidas de mitigación y adaptación ante dicha amenaza.

Ejemplo de dicho esfuerzo lo constituye el documento denominado Estrategias para el manejo de la Sequía elaborado por el antes Ministerio de Agropecuario y Forestal (MAGFOR) en el 2002, el cual estableció cuatro (4) zonas según afectación agroclimática, esbozándose un plan de actividades para el manejo de la amenaza.

Otro documento emitido por el Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional (GRUN) a través del MAGFOR que se gestó en el 2013 nombrado como el Plan de Adaptación a la Variabilidad y Cambio Climático en el sector Agropecuario, Forestal y Pesca en Nicaragua, donde se incluye entre las amenazas principales del país la sequía, caracterizando a groso modo su afectación en el corredor seco de Nicaragua, incluidos algunos municipios del área de estudio abordados en el presente documento.

Documentos con el mismo fin, pero a nivel de municipio se han elaborado por Medina (2012), denominado Perfil de Gestión de Riesgo y Plan de Contingencia del Municipio de Totogalpa, con un enfoque de preparación ante sequías, recomendándose el diseño e implementación de una política municipal para enfrentar la amenaza.

Por otro lado, diversos estudios y/o documentos a nivel regional y de corredor seco han sido elaborados con enfoque de cambio climático y agricultura, tales como el Marco Estratégico para la gestión de riesgos climáticos en el sector agrícola del corredor seco Centroamericano elaborado por FAO (2012);

Escenarios de impacto futuro en áreas de cultivos de café en Nicaragua gestado por CIAT (2012) y Escenario del clima futuro para maíz y frijol: Camino para adaptación en Nicaragua concebido por Loma, García, Córdoba y Monjo, (2014).

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1 Caracterización del problema

La sequía es uno de los fenómenos climatológicos de mayor repercusión a nivel social, económico y ambiental en todo el mundo. Según Below, Grover-Kopec, y Dilley, (2007), las sequías causaron más del 50% del total de muertes debidas a desastres naturales entre el 1900 y el 2004, representaron el 35% de la población afectada por desastres y el 7% de las pérdidas económicas, después de las inundaciones y los terremotos.

1.3.2 Delimitación del problema

En reiteradas ocasiones la sequía ha causado daños importantes en los sistemas de cultivos que se llevan a cabo en la subcuenca, trascendiendo no solo a nivel socio económico sino también a nivel ambiental. Pese a la importancia que la sequía reviste en la subcuenca y su impacto en los diferentes sistemas de cultivos, persiste un factor que agudiza el problema, la incertidumbre cuando se caracteriza su intensidad, duración, severidad y muy especialmente, su frecuencia.

MAGFOR, hoy MAG (2002), indica que los municipios de Ciudad Darío y Sébaco, se clasifican según su afectación agroclimática de sequía como zonas de incertidumbre¹, mientras, municipios tales como la ciudad de Matagalpa y

¹ Territorios que registran la mayor afectación climática en años normales, y son afectados ante la presencia de un año Niño sea fuerte, moderado o débil. La ausencia de lluvias puede darse en períodos consecutivos de más de 30 días, con una reducción severa del rendimiento en los cultivos y que en algunos casos puede ser total (MAGFOR, 2002).

Terrabona se clasifica como zonas de riesgo².

1.3.3 Formulación del problema

¿Qué prácticas productivas se deben proponer frente a la amenaza de sequía en la parte alta de la subcuenca del Río Grande de Matagalpa de acuerdo con el análisis regional de frecuencia de precipitaciones anuales?

1.3.4 Sistematización del problema

¿Cuál ha sido el comportamiento de la sequía en la parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa?

¿Cuáles son los períodos de retorno de sequías basados en el Análisis Regional de Frecuencias en la parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa?

¿Cuáles son las prácticas productivas que deben implementarse a partir de los períodos de retorno de sequía en la parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa?

1.4 JUSTIFICACIÓN

Debido a la complejidad en el estudio de las sequías, se ha ido generando un cambio en el enfoque de la atención por la amenaza misma, a la atención por el impacto que ésta puede provocar en la sociedad, en términos de acoger medidas pertinentes para la adaptación ante sus efectos.

Los períodos de retorno de sequía plasmados en mapas, constituye una de las herramientas útiles para la toma de decisiones en las políticas públicas referentes

² Territorios con alto riesgo de afectación climática en años normales y que se acentúan ante la presencia de un año Niño, mostrando un comportamiento variable de hasta 30 días consecutivos sin lluvia, y reducción relativa del rendimiento de los cultivos que pueden llegar hasta un 45 por ciento (MAGFOR, 2002).

a la mitigación de los efectos que se derivan del fenómeno de la sequía. La determinación de la probabilidad de ocurrencia de una sequía, así como, de cualquier otro tipo de variable ambiental registrada a través del tiempo, es abordada mediante la hidrología probabilística (Núñez *et al.*, 2010).

Sin embargo, las características propias de las regiones, con gran variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones, influencia de factores externos de variabilidad entre décadas, tales como los efectos del niño, y la reducida disponibilidad de registros de adecuada extensión, imponen ciertas restricciones a la elección del método más adecuado de ajuste probabilístico.

Es en este contexto, que el presente estudio enfrenta estas restricciones mediante la utilización de L-Momentos, que ha sido considerado como una de las mejores alternativas para abordar las restricciones mencionadas, para la evaluación y mapeo de la probabilidad de ocurrencia de eventos de sequía.

Este trabajo permite el diseño más preciso de prácticas productivas frente a la sequía, capaz de responder a las necesidades de ordenamiento territorial, ante la variabilidad climática para adaptarse ante sus efectos. El presente estudio unifica ambos conceptos a fin de contribuir al desarrollo de la región de estudio.

Entre los beneficiarios del presente estudio se encuentran instituciones del estado de Nicaragua (INTA, MAG, ANA, alcaldías, etc.), organizaciones no gubernamentales (P/e: UCOSD) y productores de la subcuenca.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 General

Desarrollar el Análisis Regional de Frecuencia de precipitaciones anuales para la propuesta de prácticas productivas frente a la amenaza de sequía, parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa.

1.5.2 Específicos

Caracterizar el comportamiento de la sequía en la parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa.

Estimar los períodos de retorno de la sequía basados en el Análisis Regional de Frecuencias en la parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa.

Proponer las estrategias productivas con base en los períodos de retorno de sequía en la parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa.

II. CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 PRECIPITACIÓN ANUAL

2.1.1 Precipitación en el ciclo del agua

La mayor parte de las masas de agua se encuentra contenida en los océanos (97.4 %), seguido del agua en su estado sólido en forma de hielo que se localizan fundamentalmente en las zonas polares y templadas de la tierra.

El ciclo del agua es pues, un complejo movimiento de masas de agua a diferentes escalas espaciales y temporales que muchas veces en una región bajo ciertas condiciones (cuando las proporciones de evaporación y transpiración varían considerablemente de acuerdo a las condiciones climáticas) nunca finaliza en el mar.

El ciclo hidrológico, es el fenómeno de circulación global del agua producido fundamentalmente por la energía solar, e influenciado por las fuerzas de gravedad y la rotación de la Tierra (Chow, Maidament y Mays, 1992).

A ciencia cierta no se sabe dónde se inicia el ciclo hidrológico, pero se considera que por ocupar los mares y océanos el 70% de la superficie terrestre, es ahí donde se inicia el ciclo, ya que la evaporación proveniente de ellos es mucho más alta que la de la tierra y la de algunas partes de la atmósfera (Gámez, 2009).

Según Chow *et al.*, (1992) a partir de la recepción de energía solar – que es la fuente de generación exterior - se puede comenzar a describir el ciclo del agua, con la generación de vapor de agua hacia la atmósfera por evaporación del agua líquida desde lagos, ríos, océanos, mares y por evapotranspiración desde suelos y vegetación (ver figura 4).



Figura 4. Ciclo del agua. Fuente: USGS, (s.f.).

La precipitación es la fuente de toda el agua fresca del ciclo hidrológico, cae casi en todas partes, pero su distribución es altamente variable (Winter, Harvey, Franke y Alley, 1998). La distribución está determinada por procesos eólicos y térmicos que se dan a cabo en la atmósfera y por condiciones intrínsecas de la región tales como la cobertura vegetal, tipo de suelo etc. El agua proveniente de la precipitación (en estado sólido y/o líquido), sigue distintos caminos cuando llega a la superficie terrestre en función de las características edáficas, topográficas, fitográficas, urbanas, etc.

La precipitación incluye lluvia, nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo y nevisca (Chow *et al.*, 1992).

2.1.2 Distribución de las precipitaciones anuales

2.1.2.1 Regional

El clima centroamericano presenta fuertes variaciones. Se caracteriza por el avance del clima tropical húmedo en latitud (norte, sur o ambos), especialmente en la zona este a causa del relieve y la corriente del golfo que se extiende a lo largo de la costa de México y el mar Caribe.

En la región oeste, el paso del clima continental de California a otro tropical es más notable y la cantidad de lluvia más escasa. Continuando hacia el sur, el estrechamiento del continente (americano) hace que entre una y otra zona no haya mayores diferencias, actuando el relieve como único factor diferenciador (Breña, 2004).

Aguilar (2006), expresa que la precipitación media anual del istmo centroamericano es de 400-9,000 mm. El régimen del Caribe presenta lluvia todo el año. En el régimen del Pacífico existen 2 épocas bien definidas: seca (diciembre-marzo) y lluviosa (abril-noviembre). A mitad de la época lluviosa (julio y agosto) ocurre la canícula. El sur de la región es más lluvioso que el norte.

2.1.2.2 Nacional

En términos generales, la distribución de las precipitaciones en Nicaragua, sigue el mismo patrón del clima regional centroamericano, alimentado por causa del relieve y la corriente del golfo que se extiende a lo largo de la costa de México y el mar Caribe.

Las precipitaciones aumentan de oeste a este, manifestándose discontinuidad en la zona nor-céntrica-occidental del país, donde se encuentran los valores promedios mínimos en el país.

Silvac (2002), indica que la distribución de la precipitación en Nicaragua se distribuye de forma irregular: El sector noreste (NE) del país (Región Autónoma Atlántico Norte) recibe una cantidad que oscila entre 2,000 y 3,000 mm/año. La

zona sureste (Región autónoma atlántico sur), recibe de 3,000 a 6,000 mm/año, a esta región corresponde al Bosque Húmedo Tropical con una estación lluviosa a nueve meses (mayo-febrero).

En la región central del país la precipitación promedio está por debajo de los 1,500 mm/anuales, presentándose la estación lluviosa desde mayo a octubre. En la región de Pacífico la precipitación promedio oscila entre los 1,250 y los 2,000 mm/año (MARENA, 2010) (ver figura 5).

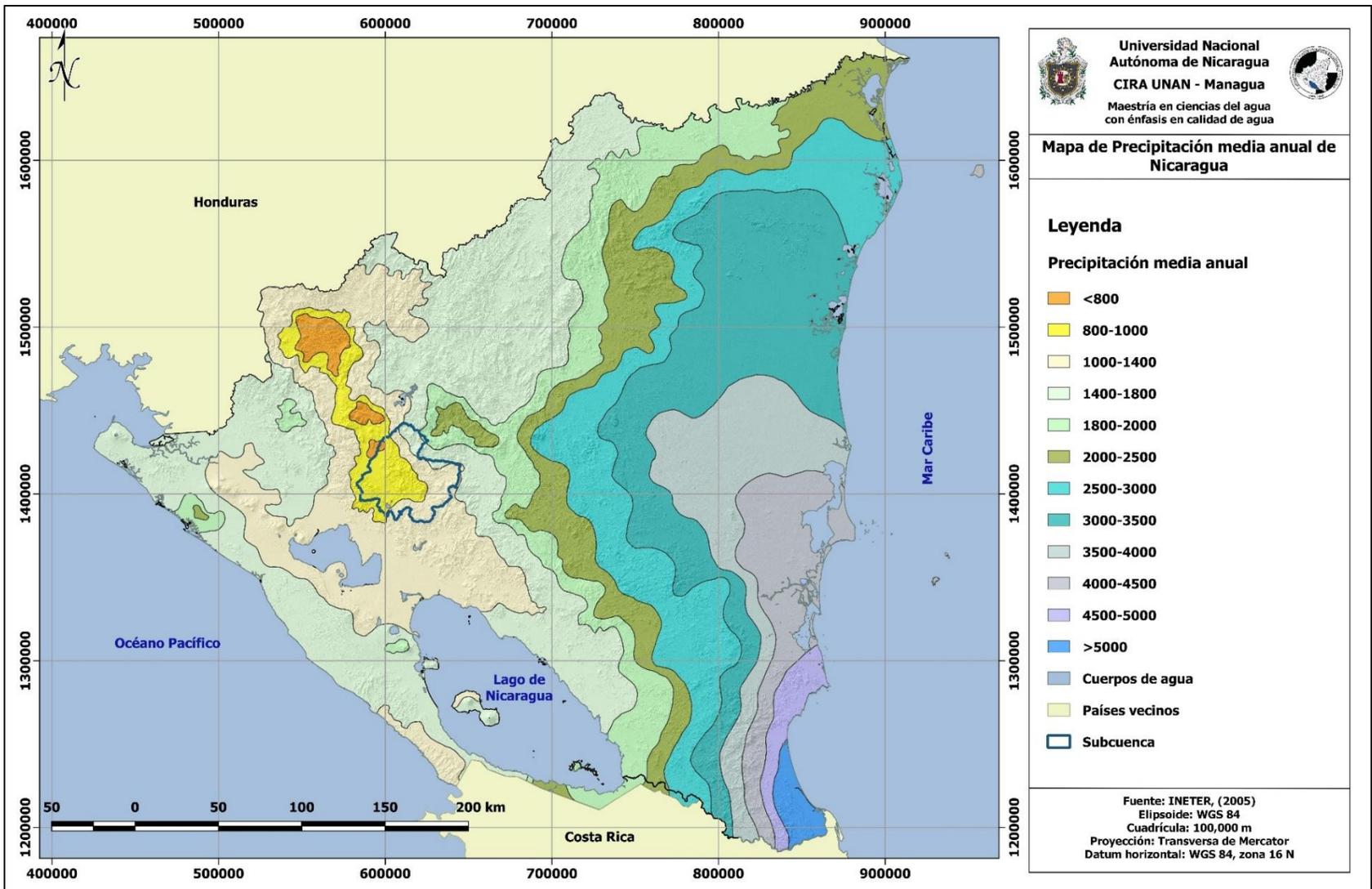


Figura 5. Precipitación Media Anual de la República de Nicaragua.

2.1.3 Factores que determinan la distribución de las precipitaciones

El mecanismo de formación de la precipitación requiere ascenso de aire y suficiente cantidad de vapor de agua (González, 1997).

Ahora bien, la humedad atmosférica depende, a su vez, de la evaporación en la superficie del agua de los océanos, mares, lagos, lagunas, ríos, arroyos y suelos húmedos, así como la evapotranspiración de las plantas y animales.

La evapotranspiración ocurre entre todos los cuerpos de agua y es función de la diferencia entre la temperatura de la superficie del agua y de la atmósfera, producida por el calentamiento debido a la radiación solar en las diversas latitudes principalmente las comprendida entre los trópicos de cáncer y capricornio (Breña, 2004).

La orografía juega un papel importante en la cantidad y distribución de la lluvia. Las elevaciones en el territorio nicaragüense oscilan entre los 0 y 2,107 msnm el 63% de la superficie terrestre es plana o ligeramente ondulado y solamente el 17% alcanza alturas de 501 a más de 1,500 msnm (Silvac, 2002).

El efecto en la latitud se presenta en dos maneras relacionados entre sí, pero con distintos efectos, la inclinación (ángulo de incidencia) de los rayos solares, que es mayor en las latitudes altas, y la relación entre la duración del día y la noche, en la cercanía de los solsticios, que varía tanto más, cuanto mayor es la latitud del lugar.

Por supuesto, cuando más cercano a la vertical, los rayos solares son más intensos. En síntesis, dentro de los trópicos la radiación solar es intensa, pero solo durante un corto lapso diurno, en cambio, en latitudes mayores, en general, la intensidad de la radiación solar en el verano es menor que en los trópicos, pero con una larga duración (Breña, 2004).

2.2 SEQUÍA

La sequía se define, como una reducción temporal notable del agua y la humedad disponible, por debajo de la cantidad normal o esperada para un periodo dado (Espín, 2000).

2.2.1 Tipos de sequías

Desde el punto de vista meteorológico, la sequía puede definirse como una condición anormal y recurrente del clima que ocurre en todas las regiones climáticas de la Tierra. Este fenómeno se caracteriza por una marcada reducción de la cantidad de precipitación que se presenta en una zona, y puede producir serios desbalances hidrológicos (Espín, 2000).

Por otro lado, según Valiente (2001), la sequía agrícola es el período durante el cual solo hay 19 mm de agua disponible en los primeros 20 cm de suelo.

Análogamente, la sequía hidrológica está referida a los efectos de períodos de precipitación relativamente cortos, es decir a los escurrimientos a nivel de superficie y subsuelo, su impacto se ve reflejado en la recarga de acuíferos, lagos, presas.

Los efectos son de largo plazo, es decir, en tanto la sequía agrícola presenta un efecto inmediato en los cultivos, la sequía hidrológica puede afectar la producción agrícola de varios años, la producción hidroeléctrica o la extracción de agua del subsuelo (Crespo, 2008).

A diferencia de la sequía agrícola, que tiene lugar poco tiempo después de la meteórica, la sequía hidrológica puede demorarse durante meses desde el inicio de la escasez pluviométrica o meteorológica (Valiente, 2001).

La sequía en el sector socio-económico, ocurre cuando las lluvias son insuficientes y tienen un efecto significativo sobre las comunidades y su economía (energía hidroeléctrica, aprovisionamiento en agua potable, en la industria, etc.) (Espín, 2000).

Los procesos en que se manifiesta la sequía suelen ser concatenaciones de procesos que exacerban la integridad ecológica de las comunidades de una región en particular.

2.2.2 Factores que conducen a la sequía

Entre las causas más relevantes, para que se produzca la sequía Magaña *et al.*, (1997), Estrada (2001) y Contreras (2003) citados por Crespo (2008), mencionan las siguientes: Las manchas solares que alteran la cantidad de energía que llega a la superficie de la Tierra; las alteraciones en la circulación de los vientos generados por modificación en el albedo superficial o por cambios en la temperatura superficial de los océanos.

Dragovic (1997) señala que, si se analizan conjuntamente las condiciones climáticas y del suelo, y, sobre todo, su balance hídrico, es posible determinar el momento en el que se llega a la situación de sequía y aplicar rápidamente las medidas oportunas para paliar los efectos negativos.

En los suelos, la sequía se produce cuando se agota el agua disponible en la zona de actividad radicular (rizósfera), con independencia de las lluvias acumuladas en el periodo anterior. Estos efectos son particularmente importantes cuando se producen en fases fenológicas críticas, es decir, de máximas necesidades hídricas de las plantas.

2.2.3 Efectos de la sequía

2.2.3.1 En la calidad físico química del agua

De acuerdo con Espín (2000), los efectos sobre la calidad del agua, complejos y combinados, pueden llegar a ser más acusados durante los periodos de sequía, especialmente debido a la mucha menor dilución y capacidad de depuración de los receptores de tales residuos.

En lo ambiental, se presentan daños, frecuentemente irreversible en la flora y fauna silvestre, se incrementa la vulnerabilidad de los ecosistemas, se intensifican los procesos de erosión hídrica y eólica, se reduce la calidad del agua, se promueve la contaminación del aire, se afecta el ciclo hidrológico en general, entre otros (Crespo, 2008).

2.2.3.2 En la dinámica socio económica

Si bien, la sequía tiene un desarrollo no tan rápido y dramático que otros desastres naturales como los huracanes, sus efectos suelen ser de mayor amplitud y más devastadores. Sus efectos directos e indirectos están fuertemente relacionados con la producción de alimentos, la reserva de agua en el suelo, la manutención de ganado, la vida silvestre y en general con la posibilidad de cualquier forma de vida en un lugar determinado. (National Drought Policy Commission, 2000 citado por Crespo, 2008).

Entre los impactos económicos, los primeros, sin duda, son los daños causados por la sequía sobre la agricultura. Quizás esta parte de la estrategia es la más sencilla, porque la mayoría de los estudios, en casi todos los países, se han realizado para valorar y demostrar los daños producidos por la sequía en la producción agrícola, tanto en cultivos extensivos, frutas y hortalizas, como en los bosques y en la ganadería (Espín, 2000).

Según Avella, (2001), el efecto de las sequías como choques de oferta de corto plazo, tiene dos etapas. La primera, es la disminución de la producción de los bienes alimentarios por el déficit de lluvias, que genera el incremento en los precios. La segunda, es la expansión del área cosechada a causa de las expectativas de precios altos y condiciones climáticas normales, que lleva a una caída en los precios de los alimentos.

En lo social, hay escasez de alimentos, malnutrición, disminución del nivel de vida, conflictos sociales por el uso del agua o de mejores tierras, incremento de la pobreza, migración, hacinamiento en las ciudades, abandono de tierras agrícolas

(Crespo, 2008).

2.3 PERIODOS DE RETORNO Y L-MOMENTOS

2.3.1 Periodo de retorno

Por definición, un evento extremo ocurre si una variable aleatoria X es mayor o igual que un cierto nivel x_T . El intervalo de recurrencia τ es el tiempo entre ocurrencias de $X \geq x_T$ (Chow *et al.*, 1992).

Por lo tanto, según Núñez *et al.*, (2010), el periodo de retorno es el valor esperado del intervalo de recurrencia promedio o tiempo entre ocurrencias promedio entre eventos que exceden o igualan una magnitud especificada de la variable aleatoria X .

Asimismo, Chow *et al.*, (1992), indica que para cada observación existen dos resultados posibles: ya sea “éxito” $X \geq x_T$ (probabilidad p) o “falla” $X < x_T$ (probabilidad $1 - p$). Debido a que las observaciones son independientes, la probabilidad de un intervalo de recurrencia de duración τ es el producto de las probabilidades de $\tau - 1$ fallas seguidas por un éxito, por lo que, resolviendo las ecuaciones resulta que la probabilidad de ocurrencia de un evento en cualquier observación es el inverso de su periodo de retorno.

2.3.2 Hidrología probabilística y L-Momentos

Los métodos estadísticos están basados en principios matemáticos que describen la variación aleatoria de un conjunto de observaciones de un proceso. Estos centran su atención en las observaciones mismas en lugar de los principios físicos que las producen (Chow *et al.*, 1992).

El análisis de frecuencia en hidrología, utiliza procedimientos para que, a partir de una serie de observaciones registradas en el tiempo, ajustar un modelo de probabilidad, que mejor represente el comportamiento de los datos respecto a su

frecuencia y permita estimar, con el menor error posible, las magnitudes (cuantiles) asociados a una determinada probabilidad o la probabilidad de que se exceda o no se exceda determinada magnitud (Núñez, 2011).

El hecho es que muchos fenómenos hidrológicos son erráticos, complejos y de naturaleza aleatoria, y solo pueden ser interpretados en un sentido probabilístico. Uno de los problemas más importantes en hidrología, es la interpretación de registros de eventos pasados para inferir la ley de probabilidades de la variable hidrológica (población) de interés, procedimiento que en hidrología se conoce con el nombre de análisis de frecuencia.

Núñez *et al.*, (2010), explica que ARF- LM se basa en el procedimiento denominado Índice de Avenidas. Este representa la media de la distribución de frecuencia del sitio, aunque puede ser utilizado cualquier otro parámetro de localización en su lugar.

Estadísticamente, los L-Momentos son combinaciones lineales de las observaciones ordenadas, obtenidas mediante los momentos ponderados por probabilidad, y, por lo tanto, no implican elevaciones cuadráticas o cúbicas como en el caso del método producto-momento, haciéndolos mucho menos sensibles a la presencia de valores atípicos (Verbist, Núñez, Soto, Naranjo y Morales, s.f.).

2.3.3 Ventajas de L-Momentos

La gran ventaja que tiene el ARF-LM sobre el uso de los métodos convencionales de ajuste probabilístico es que, probado que distintos sitios provienen de una región homogénea desde el punto de vista de la distribución de probabilidad, es posible agregar las observaciones de cada uno de ellos para obtener una sola gran estimación de los parámetros de la distribución.

Así, por ejemplo, una estimación convencional basada en una muestra de 15 años de datos puede dar una estimación bastante sesgada de la distribución de origen. Sin embargo, si se prueba que 10 estaciones, cada una con 15 años de datos, proviene de una región homogénea, entonces $n=150$. Por lo tanto, una estimación

convencional con base a los datos de una estación con 15 años es imposible que llegue al grado de precisión de aquella obtenida mediante un análisis regional de frecuencias (Núñez *et al.*, 2010).

En palabras de Hosking y Wallis, (1997), lo que el procedimiento viene a realizar es compensar la carencia de información en el tiempo, por su abundancia en el espacio. A ello se agrega otra ventaja: Los modelos de distribución, utilizados por el ARF- LM, no son los modelos convencionales utilizados en la hidrología probabilística, sino que modelos de distribución mucho más generales y flexibles, basados en 3 o más parámetros.

Según Núñez *et al.*, (2010), los L-Momentos son bastante insensible ante la presencia de valores atípicos³.

Estudios previos han demostrado que la función de distribución estimada con una función de L-Momentos es superior que los obtenidos por métodos tradicionales (Ulrych, Velis, Woodbury y Sacchi, 2000).

2.4 ESTRATEGIAS PRODUCTIVAS

2.4.1 Riesgo de sequía y adaptación en la producción de cultivos de cosecha

El riesgo es la probabilidad de que se produzcan pérdidas socio-económicas en un determinado momento y en un área determinada del territorio, a causa de una amenaza (INETER y COSUDE, 2005). La producción agrícola está sujeta a una variedad de riesgos que pueden poner en peligro la continuidad de la actividad y, por lo tanto, la posibilidad de generar ingresos a un grupo de la población.

La ocurrencia de la sequía, impacta negativamente sobre los rendimientos de los cultivos y esto se traduce en una disminución de los beneficios del productor (Wehbe, Bosch, Granada y Tarasconi, 2010).

³ Valores atípicos se refiere a valores que se aleja de la media y está dado por fenómenos puntuales o combinación de ellos. P/E: ENSO.

Los riesgos de la producción y, por lo tanto, sobre los beneficios, pueden disminuirse si se entienden como el resultado de relacionar la amenaza, o probabilidad de ocurrencia de un evento y la vulnerabilidad de los elementos expuestos (Cardona, 1993).

2.4.2 Los mecanismos de manejo de riesgo

Una vez asumida la existencia de un determinado riesgo específico, pueden aplicarse una serie de estrategias tendientes a tomar control sobre este riesgo. El empleo de mecanismos estabilizadores, como los involucrados en la gestión de riesgo, marcan la diferencia entre los distintos productores que conforman el sistema agrícola, en cuanto a su capacidad de adaptación a los sucesos climáticos adversos.

Así planteado, la capacidad de adaptación está directamente relacionada con la gestión del riesgo. Esto significa que a medida que se incorporan estrategias de manejo de riesgo aumenta la adaptación del productor a los fenómenos adversos, contribuyendo a disminuir su vulnerabilidad (Maskrey, 1993).

Las prácticas usadas por los productores para manejar el riesgo son numerosas y pueden agruparse para su mejor tratamiento. Los autores Ibarra y Skees (2007) citados por Wehbe *et al.*, (2010) las clasifican en: diversificación de riesgo; mitigación de riesgo; manejo de riesgo retenido; y transferencia de riesgo. Frente al riesgo de sequía, es de esperar que la incorporación del riego, como mecanismo de mitigación, constituya la principal opción de adaptación. Si bien este mecanismo contribuye a estabilizar los ingresos de los agricultores, también podría, asimismo, incrementar los niveles agregados de producción.

III. CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 TIPO DE ESTUDIO

De acuerdo a Piura (2006), según el diseño metodológico, el tipo de estudio es descriptivo, analítico y según el método de estudio es no experimental. De acuerdo a Canales, Alvarado y Pineda, (1996), según el tiempo de ocurrencia de los hechos y registro de la Información, el estudio retrospectivo y según el período y secuencia del estudio, es longitudinal. De acuerdo a la clasificación de Hernández, Fernández y Baptista, (2006), el tipo de estudio es correlacional. Todas las referencias antes citadas en Pedroza, (2012).

3.2 UNIVERSO Y MUESTRA

El universo lo conforma, el conjunto de condiciones y componentes del medio en que se encuentra la zona de estudio, tales como la lluvia, temperatura, suelo, caudal y variables que afectan a las antes mencionadas.

La muestra está dada por el registro de 19 estaciones pluviométricas ubicadas adyacentes y en el interior de la cuenca de estudio, así como por 4 estaciones que registran temperatura y 3 estaciones hidrométricas (caudal).

Además de ello, se realizaron 5 microcalicatas donde se tomó muestras de suelo para granulometría y se efectuaron 5 pruebas de infiltración (ver subacápite 3.6.). A continuación, se presenta las coordenadas de las estaciones meteorológicas utilizadas y su tipología:

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas del área de estudio

Estación	X	Y	Tipo
Aguas Zarcas	597596.948	1438414.15	PV
Aranjuez	617112.385	1439872.64	PV
Cacao de los Suárez	616617.466	1392218.58	PV
Corneta	604482.865	1433830.95	PV
Darío	594992.935	1406884.6	PV
Esquipulas	631215.97	1400331.75	HMP

Labranza	611954.397	1419082.3	PV
Majada	623696.88	1395013.5	PV
Mascota	616720.76	1446968.22	PV
Muy muy	649078.959	1411358.65	HMP
Quebrada Onda	604861.966	1429193.26	PV
Raúl González	587689.721	1427689.85	AG
Reyna	628734.89	1428218.26	PV
San Dionisio	624833.926	1410871.99	PV
San Ramón	625657.445	1428941.57	HMP
Santa Lastenia	612884.37	1442435.79	PV
Sébaco	598531.376	1421274.53	PV
Terrabona	612906.06	1407319.22	PV
Tierra Azul	657807.072	1403847.21	PV

AG: Estación Agrometeorológica.

HMP: Estación Hidrometeorológica Principal

PV: Estación Pluviométrica

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro 2 contiene las coordenadas de las estaciones hidrométricas utilizadas en el presente estudio.

Cuadro 2. Estaciones hidrométricas del área de estudio

ID	Nombre	Código	X	Y
1	Grande de Matagalpa en Sébaco	550103	601549	1420272
2	Grande de Matagalpa en Darío	550101	594993	1406885
3	Grande de Matagalpa en Esquipulas	550105	628476	1405696

Fuente: Elaboración propia.

Los sitios para prueba de infiltración se eligieron utilizando un muestreo a conveniencia, a fin de que cada sitio represente un área de interés desde el punto de vista agrícola. Los sitios seleccionados se detallan a continuación:

Cuadro 3. Ubicación de pruebas de infiltración

ID	Sitio	X	Y	Elevación
1	Apompuá-Darío	624877	1417778	518
2	Aranjuez	616713	1439396	1465

3	Guayacán	608370	1428610	619
4	Jucuapa	616450	1422796	960
5	Zapote	624877	1417778	518

Fuente: Elaboración propia

3.3. VARIABLES E INDICADORES

En el presente estudio se definieron tres (3) variables, las cuales, a su vez se desglosan en subvariables e indicadores (ver anexo 2). A continuación, se describe dichas variables, así como, las subvariables e indicadores que le corresponden sin tomar en cuenta su concepto (la parte conceptual fue abordada en el marco teórico):

- a) Sequía: Se caracterizó la sequía meteorológica, agrícola e hidrométrica a partir del análisis de la precipitación, evapotranspiración, humedad de suelo y el caudal. Además, se identificó la interacción entre el río y el acuífero más importante de la subcuenca, el acuífero de Sébaco.
- b) Periodos de retorno de sequía: A partir de los datos de precipitación anual de cada una de las estaciones que se encuentran dentro y adyacente a la subcuenca se estimó los períodos de retorno de sequía a través del método de Análisis Regional de Frecuencia con L-Momentos.
- c) Prácticas productivas: A partir de los resultados y el análisis de las anteriores variables se propusieron prácticas productivas en aras de mitigar los efectos que producen las sequías de diferentes magnitudes en la subcuenca, definiéndose prácticas que toman en cuenta los cultivos, el riego, la infraestructura y la planificación.

3.4 TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS E INFORMACIÓN

Las técnicas para la recolección de datos e información, están en función de la variable a medir, siendo las utilizadas en el presente estudio las siguientes: Sondeo de campo (fuente primaria) y recopilación de datos e información (fuente secundaria) procedente de instituciones oficiales. En anexo 2 se puede visualizar

las técnicas empleados para la recolección de datos e información particular para cada indicador.

3.6 PROCEDIMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para los indicadores de precipitación y caudal se solicitó datos ante el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) de las estaciones indicada en el sub acápite 3.2. Por su parte, la evapotranspiración fue calculada utilizando los datos de temperatura media, máxima y mínima de las estaciones tipo agrometeorológica e hidrometeorológica principal administradas por INETER.

Los datos necesarios para estimar la humedad del suelo se dividen en tipos meteorológicos, edafológicos y de entorno. Los datos tipo meteorológicos son los mismos datos descritos en el anterior párrafo, utilizándose las estaciones más cercanas a los sitios elegidos para pruebas de infiltración. Por su parte, los datos tipo edafológicos fueron levantados en campo, a través de diferentes procedimientos (calicatas y pruebas de infiltración).

Las pruebas de infiltración y calicatas con dimensiones de 30 cm de largo, 30 cm de ancho y 30 cm de profundidad, fueron distribuidas en la subcuenca tomando en cuenta el orden de suelo según INETER, INAFOR, MAG, MARENA y GIZ (2015), y la importancia económica que reviste la agricultura en un sitio dado. Los datos tipo entorno fueron recopilados a partir de la observación de la vegetación y pendiente predominante en los sitios donde se levantaron los datos edafológicos.

Los datos de interacción río–acuífero fueron levantados en campo, en los puntos descritos en el sub acápite 3.2.

Los datos de entrada para la modelación de los períodos de retorno en la subcuenca fueron los datos de precipitación de las estaciones enunciadas en el sub acápite 3.2.

La información de las variedades resistentes, prácticas de conservación de suelo y agua, uso potencial del suelo, sistemas agroforestales, captación de agua, riego por goteo fueron recopilada a partir de bibliografía existente en el país en dicha

temática.

Para los datos de nivel de agua e identificación de manantiales, se realizaron mediciones *in situ* utilizando un muestreo a conveniencia en la zona de estudio, y dando mayor peso a zonas con condiciones hidrogeológicas adecuadas y zonas de interés para el consumo humano y la producción.

Asimismo, se retomó la identificación de manantiales y pruebas de infiltración realizada en el 2012 por Palma y Tórrez (ver en su sub acápite Plan de tabulación y análisis: Sequía agrícola).

3.7 PLAN DE TABULACIÓN Y ANÁLISIS

3.7.1 Sequía

3.7.1.1 Sequía meteorológica

Las precipitaciones fueron sometidas a estadística descriptiva (promedio, desviación estándar), gráfico de líneas e histograma utilizando el software R 3.0.3. Se estandarizó la precipitación usando el Índice de desviación de la Precipitación (IDP) propuesto por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) y la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), (2005), la cual está contenida en la siguiente expresión:

Ecuación 1:

$$IDP = \left(\left(\frac{P_i}{PN} \right) - 1 \right) * 100$$

Dónde: P_i es la precipitación anual de la estación y PN la precipitación normal (promedio). Los autores proponen la siguiente clasificación:

Cuadro 4. Clasificación de sequía meteorológica

Nº	Categoría	Criterio
1	Sequía débil	$15 < IDP < 30$

2	Sequía moderada	30<IDP<45
3	Sequía severa	IDP>45

Fuente: Elaboración propia con base en INETER y COSUDE (2005).

El cálculo de la evapotranspiración, se realizó a través del método de Hargreaves y Samani (1985), citado por Sánchez (2004), el cual utiliza las temperaturas mensuales (medias, máximas y mínimas) para su cálculo, haciendo uso de Excel 2007 para el cálculo de la siguiente expresión matemática:

Ecuación 2:

$$ET_0 = 0.0023 * (t_{med} + 17.78) * R_o * (t_{max} - t_{min})^{0.5}$$

Dónde: T_{med} es la temperatura media, R_o , la radiación extraterrestre, T_{max} , la temperatura máxima y T_{min} la temperatura mínima.

Al igual que las precipitaciones, se estandarizó la evapotranspiración utilizando la ecuación 1, derivado de la metodología de INETER y COSUDE (2005).

3.7.1.2 Sequía agrícola

La relación entre suelo, agua y planta permite evaluar los momentos donde la precipitación es insuficiente para que los cultivos se desarrollen de manera óptima. Por tanto, para el presente estudio se utilizó la definición de sequía agrícola propuesto por Kulik (1962), citado por Valiente (2001), que establece la sequía agrícola, como el período durante el cual solo hay 19 mm de agua disponible (humedad aprovechable del suelo) en los primeros 20 cm de suelo.

La humedad aprovechable del suelo se obtuvo a partir del balance hídrico de suelos de Schosinsky (2006), cuyo principio se detalla a continuación:

El estudio del balance de suelos se basa en el principio de la conservación de la materia. O sea, el agua que entra a un suelo, es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale de él. Las entradas son debidas a la infiltración del

agua hacia el suelo y las salidas se deben a la evapotranspiración de las plantas, más la descarga de los acuíferos (Schosisky, 2006). Para efectos de la presente investigación el balance hídrico de suelos evaluó únicamente la humedad del suelo (y los procesos que lo anteceden) que permanece una vez ha ocurrido el fenómeno de la percolación (recarga al acuífero).

Lluvias menores de 5 mm mensuales no van a generar infiltración ya que se considera que en un mes con lluvia, al menos 5 mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo (Schosinsky y Losilla, 2000). Además, se considera que la retención de la lluvia en follajes es del 12% (Butler, 1957) de la precipitación mensual. Sin embargo, en bosques muy densos, la retención de la lluvia se considera en un 20% (Linsley *et al.*, 1958).

En vista de lo previamente explicado, Schosinsky (2006), propone lo siguiente:

Ecuación 3. Si P es menor o igual a 5 mm/mes, $Ret = P$

Ecuación 4. Si el producto (P) (Cf_0) es mayor o igual de 5 mm/mes, $Ret = P(Cf_0)$

Ecuación 5. Si P es mayor de 5 mm/mes y el producto (P) (Cf_0) menor de 5, $Ret = 5$

Dónde:

P = Precipitación mensual del mes (mm/mes).

Ret = Retención de lluvia en el follaje (mm/mes).

Cf_0 = Coeficiente de retención del follaje, para bosques muy densos $Cf_0 = 0,20$, otros $Cf_0 = 0,12$ (adimensional).

La elección del coeficiente de retención del follaje se hizo de acuerdo a anotaciones *in situ* de la vegetación, en contraste con los mapas de uso de suelo de Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) *et al.*, (2015).

El coeficiente de infiltración, es el factor por el cual hay que multiplicar la precipitación mensual para obtener el agua que se infiltra mensualmente hacia el suelo. En una zona dada, entre menor sea la pendiente del terreno y mayor sea su cobertura vegetal, la velocidad de escurrimiento se retrasa, generando una mayor infiltración (Schosinsky y Losilla, 2000).

Cuadro 5. Fracción que infiltra por efecto de la pendiente

Terreno	Pendiente (%)	Coficiente (K_p)
Muy plano	0-1	0.4
Plano	1-15	0.15
Algo regular	15-30	0.10
Poco regular	30-50	0.07
Muy irregular	50-70	0.05
Pronunciada	>70	0.01

Fuente: Schosinsky y Losilla, (2000).

La ecuación de propuesta por Schosinsky (2006) para el cálculo del coeficiente de infiltración del suelo está dado por:

Ecuación 6. Si $K_p + K_v + K_{fc}$ es mayor de 1, $C_i = 1$

Dónde:

C_i = Coeficiente de infiltración (adimensional).

K_p = Fracción que infiltra por efecto de pendiente (adimensional) (Cuadro 5).

K_v = Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal (adimensional) (Cuadro 6).

K_{fc} = Fracción que infiltra por textura del suelo (adimensional) (Ecuación 7, 8 y 9).

Cuadro 6. Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal

Por cobertura vegetal	Coefficiente (Kv)
Cobertura con zacate en una proporción menor a 50%	0,09
Terrenos cultivados	0,1
Cobertura con pastizal	0,18
Bosque	0,2
Cobertura con zacate en una proporción mayor a 75%	0,21

Fuente: Elaboración propia.

Uno de los factores que más influyen en la infiltración de la lluvia en el suelo, es el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (K_{fc}), que está dado tentativamente por la siguiente ecuación (Schosinsky y Losilla, 2000):

Ecuación 7. $K_{fc} = 0.267 \ln(fc) - 0.000154fc - 0.723$, Si fc se encuentra entre 16 y 1568 mm/d

Ecuación 8. Si fc es menor a 16 mm/d, $K_{fc} = 0.0148fc/16$

Ecuación 9. Si fc es mayor de 1568 mm/d, $K_{fc} = 1$

Dónde:

fc : Velocidad de infiltración básica.

En el presente estudio la velocidad de infiltración básica se obtuvo de mediciones in situ a través del método de doble anillo, aplicando la ecuación propuesta por Reynolds *et al.*, (2002).

Ecuación 10.

$$\frac{q_s}{k_s} = \frac{H}{C_1d + C_2a} + \frac{1}{\alpha(C_1d + C_2a)} + 1$$

Dónde,

q_s : Velocidad quasi-constante

k_s : Infiltración Básica

C_1 : 0.316π

C_2 : 0.184π

d : Profundidad a la cual fue insertada el anillo

a : radio del anillo interno

α : Longitud macroscópica efectiva, que se tomó a partir de referencia bibliográfica en conformidad con el siguiente cuadro:

Cuadro 7. Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal

Categoría de la textura y estructura del suelo	α (cm ⁻¹)
Materiales compactos, no estructurados, arcillosos o limosos, con los revestimientos y cubiertas de los vertederos o sedimentos lacustres o marinos	0.01
Suelo de textura fina (arcilloso limoso) y sin estructura; puede incluir algunas arenas finas	0.04
La mayoría de los suelos estructurados, desde los arcillosos hasta los francos; también incluye suelos arenosos finos e intermedios no estructurados. Esta es la categoría que más se aplica a los suelos agrícolas	0.12
Suelos arenosos y cascajos; puede incluir también suelos altamente estructurados o agregados, así como los suelos con grietas grandes y/o numerosas, y macroporos	0.36

Fuente: Elrick *et al.*, (1989).

La precipitación que infiltra (P_i) está dada por el producto del coeficiente que infiltra (C_i) y la precipitación (P), menos la lluvia retenida (Ret). Esta relación apunta a la siguiente expresión según Schosinsky (2006):

Ecuación 11:

$$P_i = C_i * (P - Ret)$$

En la evapotranspiración se producen pérdidas por evaporación del suelo húmedo que se encuentra cercano a la superficie. Por otra parte, la vegetación a través de sus raíces toma del agua almacenada en el suelo y la transpira a través de sus estomas. Al ser la fuente de abastecimiento la misma para estos dos procesos, es prácticamente imposible diferenciar claramente los porcentajes que corresponden a cada uno.

Por ello en hidrología son considerados en conjunto bajo la denominación de evapotranspiración (ET).

Existe dos tipos de evapotranspiración: Potencial (ET_0) y real (ETR). La primera se calculó a partir de la ecuación 2. La Evapotranspiración real se calculó conforme a lo propuesto por Schosinsky (2006):

Ecuación 12:

$$ETR = (c_1 + c_2) * ET_0 / 2$$

Dónde:

c_1 : Coeficiente de humedad máximo sin considerar la evapotranspiración potencial

c_2 : Coeficiente de humedad mínimo considerando la evapotranspiración potencial

c_1 se calculó a partir de la siguiente expresión matemática según Schosinsky, (2006):

Ecuación 13.

$$c_1 = (HS_i - PM + P_i) / (CC - PM)$$

Donde,

HS_i: Humedad inicial del suelo

PM: Punto de Marchitez Permanente

P_i: Precipitación que infiltra

CC: Capacidad de campo

Por su parte, c_2 está dado por la siguiente ecuación:

Ecuación 14:

$$c_2 = \frac{(HS_i - PM + ETR1)}{CC - PM}$$

Dado que:

Ecuación 15. $ETR1 = c_1 * ET_0$

Dónde, ETR1: Evapotranspiración real considerando la humedad correspondiente al coeficiente c_1 .

ET_0 : Evapotranspiración potencial

Por último, la humedad del suelo final al final del mes (HS_f), la cual no puede ser mayor que la capacidad de campo, se obtiene con la siguiente ecuación:

Ecuación 16. Si $HD + PM - ETR < CC$, entonces $HS_f = HD + PM - ETR$

Ecuación 17. Si $HD + PM - ETR > CC$, entonces $HS_f = CC$

Donde:

HD: Humedad Disponible

La humedad disponible está dada por la siguiente expresión:

Ecuación 18. $HD = HS_i + P_i - PM$

HS_i : Humedad del suelo inicial. Para el presente estudio se utilizó como humedad inicial, la humedad del suelo al final del mes anterior. Se asumió que la humedad al final del mes de octubre es igual a capacidad de campo del suelo en cuestión, en conformidad con Schosinsky (2006).

La Capacidad de Campo (CC)⁴ fue determinada por medio de la fórmula de Bodman y Mahmud, (1931), a partir de textura de suelo (granulometría). El Punto de Marchitez Permanente (PMP)⁵ fue calculado a partir de la fórmula de Máximov citada por Múgica (2011) y densidad aparente (Da), a través de tablas en función de su granulometría propuesto por Múgica, (2011). Para la selección del sitio de

⁴ $CC (\%) = 0.023(\text{Arena}) + 0.25(\text{Limo}) + 0.61(\text{Arcilla})$

⁵ $PMP (\%) = 0.001(\text{Arena}) + 0.12(\text{Limo}) + 0.57(\text{Arcilla})$

muestreo del suelo, se rigió bajo el mismo principio de selección de sitio de las pruebas velocidad de infiltración básica. (ver acápite 3.2).

La muestra de suelo, para la determinación de granulometría fue secada a temperatura ambiente y homogeneizada; posteriormente, fue pesada una fracción y procesada al Baño de María a 85-90° C, con peróxido de hidrógeno para destruir la materia orgánica presente. Luego se añadió pirofosfato de sodio y se dejó reposar por 8 horas.

Las fracciones separadas fueron las siguientes: 2-0.6 mm; 0.6-0.2 mm; 0.2-0.063 mm; respectivamente por medio del tamizado de las muestras del sedimento y las fracciones 0.063-0.02 mm; 0.02-0.006 mm, 0.006-0.002 mm y menor de 0.002 mm fueron separadas, utilizando la pipeta de Köhn. La contribución de cada fracción se determinó mediante métodos gravimétricos y se expresa en porcentaje (Norma austriaca L-1061-88).

La muestra fue tomada de los suelos provenientes de las microcalicatas. Para el análisis de granulometría se hizo uso de gráficos ternarios, donde cada eje constituye un tamaño de partícula en específico. Para ello, se hizo uso del programa R 3.0.3. Para la generación de mapas se hizo uso del software QGIS 2.10.1

Los datos introducidos al modelo de balance de suelos de Schosinsky consistieron en los datos de precipitación y evapotranspiración (estimada a partir de la temperatura) de las estaciones pluviométricas (PV) y meteorológicas principales (HMP) más cercanas a las pruebas de infiltración realizadas, en conjunto con los datos de suelo estimados previamente descritos. El resultado fue comparado con el valor crítico propuesto por Kulik (1962), citado por Valiente (2001), previamente descrito.

3.7.1.3 Sequía hidrológica

Para determinar la relación existente entre la sequía meteorológica y la sequía hidrológica se recurrió a la construcción de curvas de caudales clasificados, o

curvas de permanencia a partir de los caudales medios mensuales de la estación lluviosa comprendida de mayo a noviembre. Los años de sequía se consideran aquellos donde la estación meteorológica más cercana se clasificaba como sequía moderada o severa; o como año normal, cuando las precipitaciones variaban respecto a la norma entre -15 % y 15 % ($-15 \% < x < 15 \%$) del IDP, generando bajos caudales.

Para la construcción de las curvas de permanencia, se utilizó la metodología propuesta por Kannan (2012), citado por Sánchez (2013), la cual consiste en el ordenamiento de los caudales de mayor a menor, asignándosele un número de orden, y estimándose la probabilidad de excedencia a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 19.

$$P(x) = \frac{m}{N + 1}$$

Dónde,

P(x): Probabilidad del caudal medio de ser igualado o excedido

m: número de orden

N: Total de Registros.

Se determinó la interacción entre río y acuífero a través de tres seepages, ubicados en la entrada y salida del valle de Sébaco, así como en su parte medular. Se realizó las pruebas en el Valle de Sébaco, por ser el acuífero más productivo de la sub cuenca. El ensayo de seepage consiste en introducir un recipiente en el lecho del río con un volumen conocido, y posteriormente medir la variación de este volumen una vez transcurrido cierto lapso de tiempo.

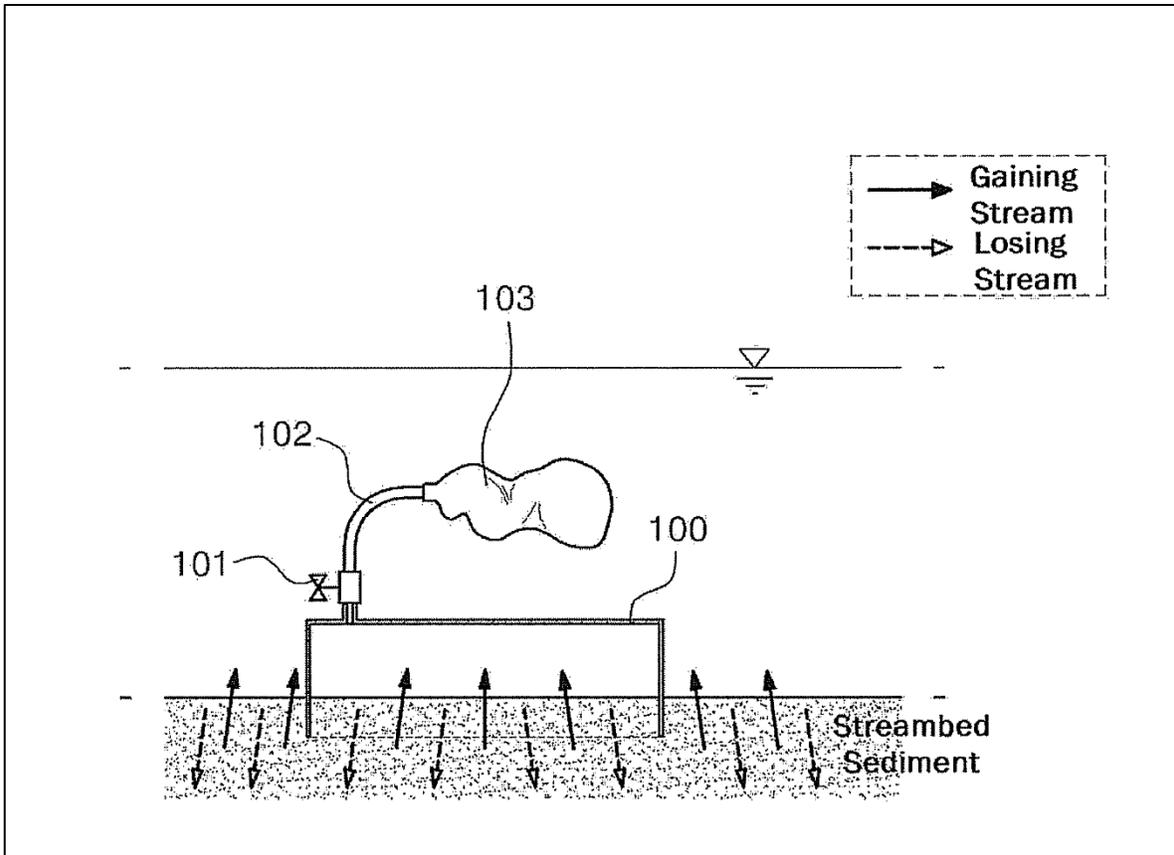


Figura 6. Representación del Método de Seepage.

3.7.2 Períodos de retorno de sequía: Modelo análisis regional de frecuencia basado en L-Momentos

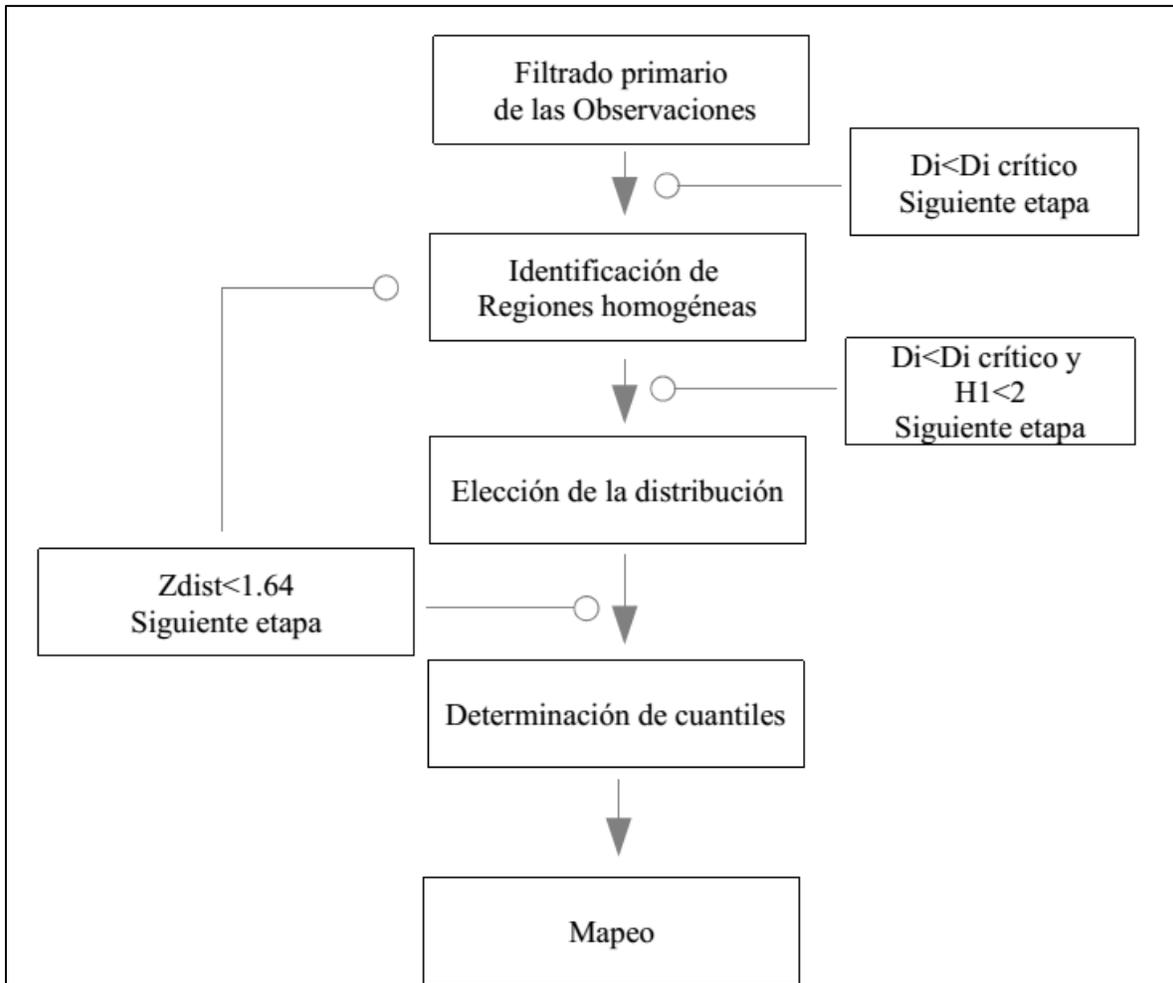


Figura 7. Diagrama de flujo del análisis regional de frecuencia de precipitación. Fuente: Modificado de Núñez et al, (2010).

El filtrado primario de las observaciones tiene por objetivo maximizar el conocimiento del comportamiento general de los datos, detectar valores atípicos o anomalías, realizar ajustes de los datos, etc. (Núñez *et al.*, 2010).

Para el caso concreto de las precipitaciones, dos tipos de errores son habituales en las muestras. Por un lado, posibles fallos en el grabado o la transcripción de los datos, que conducen a valores incorrectos; por otro, posibles cambios en las circunstancias bajo las cuales la variable fue medida. Esto puede ser el reemplazo

de los aparatos de medición o su traslado de un lugar a otro. En caso de existir, ambos errores conducen a una distribución de frecuencias no constante en el tiempo. De ahí que neutralizarlos se convierta en labor imprescindible (Erro, 2011).

En el presente estudio, como parte del filtrado primario de las observaciones, se eliminaron aquellos años que presentaban datos faltantes, para evitar introducir error en los L-Momentos.

Hosking y Wallis (1997), establecen que los cambios de tendencia, valores atípicos, valores incorrectos y demás errores de una muestra, quedan reflejados en sus L-Momentos. Definen así, la medida de la discordancia, un estadístico que compara los L-Momentos de cada estación en una región con los del resto de estaciones y los valores medios de dicha región.

Ecuación 20:

$$D_i = \frac{1}{3} N (u_i - \bar{u})^T A^{-1} (u_i - \bar{u})$$

Dónde, N: Número de estaciones.

u_i : Vector que contiene los valores de los ratios de L-momentos de la estación i.

\bar{u} : Vector promedio de las estaciones que contiene los valores de los ratios de L-momentos.

A: Matriz de suma de cuadrados y productos cruzados, dado por la siguiente ecuación:

Ecuación 21:

$$A = \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T$$

Ecuación 22:

$$\bar{u} = N^{-1} \sum_{i=1}^N u_i$$

Si se tiene una estación en particular (u_i) con sus respectivos L-Momentos (t, t_3, t_4) es posible formar el valor de discordancia (D_i), comparando cada estación con su

promedio (\bar{u}). T implica que existe transposición de las matrices.

El valor resultante debe ser comparado con un valor crítico D_i , según el número de estaciones. Todos aquellos valores de las estaciones por encima del valor crítico de discordancia, deben ser tomados como valores de “baja calidad”. Por tanto, valores inferiores al valor crítico pueden pasar a la siguiente etapa del modelo.

Cuadro 8. Valor crítico de discordancia

Número de sitios	Valor Crítico	Número de sitios	Valor Crítico
5	1.333	10	2.491
6	1.648	11	2.632
7	1.197	12	2.757
8	2.140	13	2.869
9	2.329	14	2.971
Valor de Discordancia		15	3

Fuente: Elaboración propia con base en Núñez *et al.*, (2010).

La identificación y formación de regiones homogéneas, es el segundo paso en el Análisis Regional de Frecuencia (ARF-LM). Este es un proceso iterativo (Schaefer *et al.*, 2006). Hosking y Wallis, (1997), proponen basar la definición de las diferentes regiones en los descriptores físicos, reservando las observaciones para testear la homogeneidad de la regionalización propuesta.

Hosking y Wallis, (1997), consideran el análisis clúster como la alternativa más apropiada. Se trata de un método estándar de análisis multivariante, por el que se asocia un vector a cada una de las estaciones, que son divididas y agrupadas atendiendo precisamente a la similitud entre vectores.

No hay que pasar por alto la idea de que no existe un número de clúster “correcto”, sino que es el área estudiada, la que marca la necesidad de agrupar en más o menos regiones. En este sentido, es evidente que clúster con pocas estaciones corre el riesgo de mejorar muy poco la precisión en las estimaciones,

con respecto a los métodos de análisis local, mientras que regiones de gran tamaño pueden vulnerar el criterio de homogeneidad. Por ello, la elección de algoritmos que tienden a formar clúster de tamaño y variabilidad parecida, como el método de Ward o el enlazado promedio, parece la opción más razonable (Erro, 2011).

Según Hosking y Wallis (1997), el supuesto básico del análisis regional de frecuencias, es que la distribución subyacente para un conjunto de sitios, es la misma, dentro de una región homogénea. Por lo tanto, se requiere de una medida de este grado de homogeneidad. La estadística H1, mide la variabilidad relativa del coeficiente de L-Variación (L-CV, en inglés) observado a partir de la muestra, y es utilizada para analizar la heterogeneidad en cada una de las regiones homogéneas propuestas (Wallis *et al.*, 2007). El criterio de homogeneidad utilizado en este estudio se basa en Wallis *et al.*, (2007) contenido en tabla 9.

Ecuación 23:

$$H1 = (V - \mu_V) / \sigma_V$$

Dónde, V: Desviación estándar ponderada de los L-CV locales y está dada por la ecuación 24.

μ_V : Media de V.

σ_V : Desviación estándar de V.

Ecuación 24:

$$V = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N n_i (t^i - t^R)^2}{\sum_{i=1}^N n_i} \right\}^{0.5}$$

Dónde, n_i : Longitud muestral.

t^i : Ratios de L-Momentos.

t^R : Ratios medios regionales, ponderados proporcionalmente en función de la longitud muestral, dado por la ecuación 25.

Ecuación 25:

$$t^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i t^i}{\sum_{i=1}^N n_i}$$

Cuadro 9. Valor crítico de heterogeneidad

Heterogeneidad	Wallis <i>et al.</i> , (2007)
Homogénea	H1<2
Posiblemente heterogénea	2<H1<3
Heterogénea	H1>3

Fuente: Núñez *et al.*, (2010).

La tercera etapa está dada por la elección de la distribución. Hosking y Wallis, (1997), desarrollan una medida de bondad de ajuste basada en las estadísticas medidas de los L-Momentos regionales. El procedimiento para aceptar una o varias distribuciones de mejor ajuste se basan en el valor ZDist. Si $ZDist \leq |1.64|$, entonces se acepta la hipótesis de buen ajuste de la distribución, caso contrario, se rechaza. Las distribuciones más comunes que pueden ser utilizadas para evaluar la medida de mejor ajuste en el contexto del ARF basado en L-Momentos son: Pareto Generalizada, Generalizada de Valor Extremo, Generalizada Normal, Pearson Tipo III, Generalizada Logística, Kappa de 4 parámetros y “Gaucho” (Núñez *et al.*, 2010).

Ecuación 26:

$$Z^{Dist} = \frac{\tau^{Dist} - t_4^R + B_4}{\sigma_4}$$

Dónde, τ^{Dist} : Coeficiente L-kurtosis de la distribución ajustada.

t_4^R : Los ratios medios regionales del cuarto momento.

B_4 : Sesgo de t_4^R , dado por la ecuación 28.

σ_4 : Desviación estándar de t_4^R , estimada a partir de la ecuación 27.

Ecuación 27:

$$\sigma_4 = \left[(N_{Si})^{-1} \left\{ \sum_{m=1}^N (t_4^{[m]} - t_4^R)^2 - N_{Si} B_4^2 \right\}^{1/2} \right]$$

Dónde, N_{Si} : Número de simulación con N sitios.

$t_4^{[m]}$: Valor regional de L-Kurtosis.

Ecuación 28:

$$B_4 = N^{-1} \sum_{m=1}^N (t_4^{[m]} - t_4^R)$$

La cuarta etapa es la determinación de cuantiles, la función de cuantiles de la variable aleatoria X, asociada a un evento específico en análisis (en el presente estudio, el cuantil de interés corresponde al 0.55, 0.7 y 0.85, es decir, reducción de la precipitación anual por el orden del 45%, 30% y 15 % respecto a la precipitación media anual), es función de la curva de crecimiento regional y de un factor de escala (Núñez *et al.*, 2010). Esto es:

Ecuación 29:

$$Q_i = \mu_i q(F)$$

Dónde, Q_i : Función cuantil de la distribución de frecuencia en la estación i.

μ_i : Factor de escala local de la estación i.

$q(F)$: Curva regional de frecuencia.

La función de cuantiles del sitio de interés (Q_i), se determina a partir de la función de cuantiles regional adimensional (curva de crecimiento regional), estimada mediante el análisis regional de frecuencias y multiplicada por un factor de escala, que puede ser, por ejemplo, el promedio de la variable analizada para el sitio de interés (Núñez *et al.*, 2010). En el presente estudio, se fijó como factor de escala la Precipitación Media Anual proveniente de la interpolación tipo Kriging Ordinario de 30 estaciones que están adyacentes y dentro de la subcuenca; es decir, se tomó en cuenta 11 estaciones adicionales a las estaciones en estudio. Esto con el

objetivo de evitar el uso de métodos de extrapolación. De acuerdo con Hengl (2009), indica que las predicciones son basadas en el siguiente modelo:

Ecuación 30:

$$Z(s) = \mu + \epsilon(s)$$

Dónde, μ es la constante de la función estacionaria (media global), y $\epsilon(s)$ es la correlación espacial estocástica que parte de la variación. Por lo que las predicciones son realizadas a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 31:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n w_i(s_0) * z(s_i) = \lambda_0^T * z$$

Dónde λ_0 es el vector de las ponderaciones Kriging (w_i), z es el vector de n observaciones en la locación primaria. El mismo autor indica que Kriging puede ser visto como una sofisticación de la Interpolación de Distancia Inversa, por lo que intuitivamente, se establece que debe haber una manera de estimar las ponderaciones objetivamente, ya que las mismas reflejan la verdadera estructura de autocorrelación espacial. Matheron y sus colegas introdujeron el análisis de datos de puntos denominado semivarianzas, que no es más que la diferencia entre los valores vecinos. Posteriormente, se plotea el promedio de las semivarianzas y las distancias de separación (*lag*), lo cual, produce un gráfico denominado variograma.

Para verificar el ajuste de interpolación se recurrió a cinco métodos: Coeficiente de determinación⁶, Error Absoluto Medio (Mean Absolute Error)⁷, Sesgo Medio (Mean

⁶ Coeficiente de Determinación: Se define como la proporción de la Varianza que es explicada por la regresión. En el presente estudio se refiere al ajuste del modelo teórico con los datos del semivariograma.

⁷ Error Absoluto Medio: Se estima a partir del promedio del valor absoluto de la sumatoria de las diferencias entre los valores simulados y medidos.

Bias Error)⁸, Raíz del Error Cuadrático Medio (Root Mean Square Error)⁹ y validación cruzada.

La última etapa es el mapeo, donde el método de ARF basado en L-Momentos, posee la facilidad de implementar el mapeo espacial de los cuantiles, probabilidades o periodos de retorno, considerando aquellos sitios medidos y no medidos.

Para la generación de cartografía es necesario realizar ciertas adaptaciones que relacionen a los L-Momentos con una determinada variable y estimar la distribución espacial de los L-Momentos. Para este procedimiento se requieren mapas continuos de una variable, la cual se utiliza como variable auxiliar para las estimaciones espaciales de los L-Momentos.

Se han identificados diversos predictores matemáticos para describir el comportamiento regional de L-coeficiente de variación y L-sesgo en función de la precipitación media anual. Esta variable posee la característica de explicar adecuadamente las variaciones espaciales de los L-Momentos (Wallis *et al*, 2007).

Ecuación 32:

$$L - Momento = \alpha e^{-\beta(PMA)} + \delta$$

Ecuación 33:

$$L - Momento = \beta + \beta(\ln[PMA])$$

Ecuación 34:

$$L - Momento = \alpha PMA^2 + \beta PMA + \delta$$

Dónde los L-Momentos puede estar representado por el coeficiente de variación

⁸ Sesgo Medio: Se define como el promedio de la sumatoria de las diferencias de los valores simulados versus los valores medidos.

⁹ Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE por sus siglas en inglés): Se estima a partir de la raíz cuadrada del promedio de la sumatoria de las diferencias de los cuadrados de los valores simulados y los valores medidos.

lineal (LCV), asimetría lineal (L-asimetría) o kurtosis lineal (L-Kurtosis); PMA es la precipitación media anual y α , β , δ , son constantes.

El modelo se llevó a cabo en el Software R 3.0.3, por medio de la frontal R Studio 0.98.501, utilizando el script de Núñez *et al.*, 2010, modificado por Agustí Forguet (2013), y re modificado en el presente estudio (2014); mientras los mapas fueron confeccionados y preparados en QGIS 2.10.1

3.7.3 Prácticas productivas para la mitigación de la sequía

Las prácticas productivas fueron elegidas a partir de la recolección y filtrado de la información, ajustándose de acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio y datos levantados en campo.

3.7.3.1 Cultivos

Se identificó aquellas variedades por cultivo que de acuerdo al Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA) y otras instituciones, son tolerantes a la sequía, por lo que su establecimiento en momentos de sequía se hace recomendable.

3.7.3.2 Suelo

En el presente estudio se hace recomendaciones de un conjunto de actividades tanto física (prácticas de conservación de suelo y agua) como de planificación (uso potencial de suelo) que permita que el suelo tenga la capacidad de retener agua durante mayor tiempo.

3.7.3.3 Riego

Las recomendaciones del riego se basan en determinar la dotación general de

cada cultivo, de acuerdo a las condiciones edafoclimáticas de cada zona, y en identificar fuentes de agua (nivel de agua subterránea e identificación de manantiales), analizando su potencial con enfoque agropecuario.

La dotación de riego fue calculada a partir del coeficiente de cultivo propuesto por la FAO (Allen *et al.*, 2006) contenida en la siguiente expresión:

Ecuación 35:

$$ET_c = K_c * ET_0$$

Donde, ET_c : evapotranspiración del cultivo (mm d^{-1}),

K_c : coeficiente del cultivo (adimensional),

ET_0 : evapotranspiración del cultivo de referencia (mm d^{-1}) (Para el presente estudio se utilizó la evapotranspiración de Hargreaves).

La identificación de fuentes de agua se lleva a cabo en dos niveles: En pozos y manantiales. El primer nivel se llevó a cabo en el valle de Sébaco, retomando mediciones del Centro de Investigación para los Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA), así como, en pequeños valles intramontanos realizando mediciones *in situ* utilizando sonda interfásica de 300 m, realizando un muestreo a conveniencia según criterio hidrogeológico.

El segundo nivel (identificación de manantiales) se realizó en las divisorias de la sub cuenca, realizando mediciones de caudal utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 36:

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

Dónde:

V: Volumen

t: Tiempo

El volumen conocido se midió en el tiempo, procedimiento que se repitió tres veces, para aumentar la confiabilidad de los datos.

3.7.3.4 Infraestructura

Este sub acápite está orientado a identificar aquellas infraestructuras que coadyuve a retener agua, a fin de ser utilizada como riego complementario. Se revisó bibliografía proponiendo estructuras ingenieriles como punto de partida, así como tecnologías de riego que permita la optimización del uso del recurso.

3.7.3.5 Planificación

Se propone una estructura de planificación para mitigar los efectos de la sequía, involucrando diferentes actores sociales, en pro de fortalecer el capital tanto económico como humano ante la amenaza.

IV. CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 COMPORTAMIENTO DE LA SEQUÍA

4.1.1. Meteorológica

4.1.1.1 Precipitación

El cuadro 10 muestra el conjunto de estaciones que serán objeto de análisis por el presente estudio. Estas se eligieron atendiendo criterios hidrológicos tales como que se encuentre dentro o adyacente a la sub cuenca, longitud de registro de al menos 12 años o más, y en general que contenga la variable en estudio (precipitación anual).

En total, se eligieron 19 estaciones, con longitudes de registro que van desde 14 años (Santa Lastenia) hasta 58 años (Sébaco). El promedio de longitud de registro de las estaciones es de 28.58 años.

Cuadro 10. Datos generales de las estaciones utilizadas en el presente estudio

Estación	Registro (años)	Período (Años)	PMA (mm)
Aguas zarcas	39	1969-1986, 1991-2011	882.40
Aranjuez	34	1975-1988, 1991-2010	1756.08
Cacao de los Suárez	16	1995-2010	1171.84
Corneta	19	1991-1997, 2000-2011	948.34
Darío	42	1966-1988, 1993-2011	880.36
Esquipulas	34	1970-1980, 1993-2007	1302.96
Labranza	24	1969-1979, 1981-1989, 1991-1995	969.50
Majada	25	1971-1972, 1974-1988, 1991-1988	1046.39
Mascota	29	1972-1975, 1977, 1979-1983, 1993-2011	1685.64
Muy muy	40	1970-2009	1530.32
Quebrada honda	21	1989, 1991, 1993-2011	745.95
Raúl González	28	1984-1987, 1989-2012	909.61
Reyna	22	1981-1988, 1991-2010	1481.86

San Dionisio	26	1970-1995	1378.84
San Ramón	24	1969-1989, 1993-2005, 2009-2010	1777.46
Santa Lastenia	14	1997-2011	1562.70
Sébaco	58	1952-1989, 1992-2011	916.69
Terrabona	25	1971, 1973-1987, 1991-1998	928.18
Tierra azul	23	1970-1978, 1980-1987, 1991-1995	1552.12

Fuente: Elaboración propia con base a INETER (2013).

Es importante destacar que, solo 4 estaciones poseen series de datos en el tiempo continuo (Muy muy, San Dionisio, Cacao de los Suárez, Santa Lastenia), 5 estaciones presentan 3 interrupciones o cortes en sus series (Majada, Terrabona, Labranza, San Ramón y Tierra azul) y una estación presenta 4 cortes (Mascota).

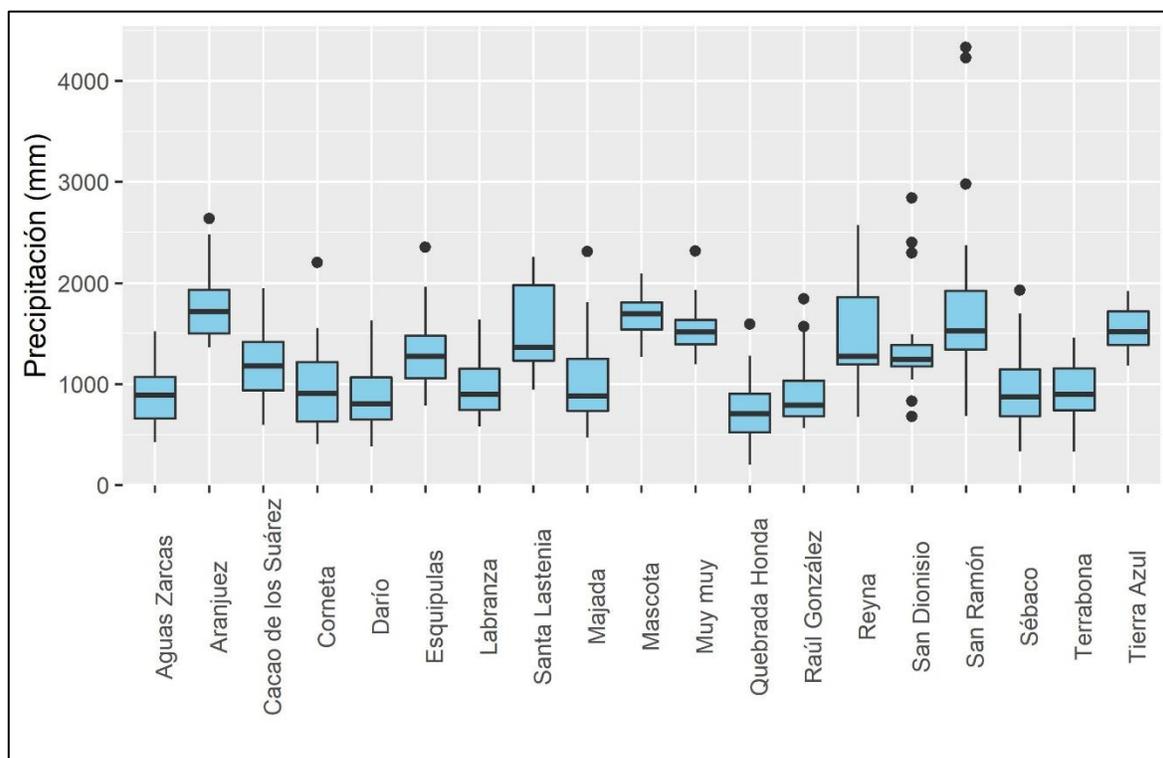


Figura 8. Boxplot de Precipitación Media Anual de las estaciones en estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de PMA de INETER (2013).

La media de la precipitación anual de las estaciones es de 1,233.01 mm, el

máximo corresponde a 1,777.46 (San Ramón), y el mínimo a 745.95 mm (Quebrada honda).

Según Saéz (2012), el boxplot es una técnica gráfica que permite detectar valores atípicos mediante los percentiles. Este diagrama incluye la mediana o segundo cuartil, el valor de los percentiles 25 y 75 (P25 y P75), y los límites que están dados por el percentil 25, menos el producto de 1.5 veces el rango intercuartílico para el límite inferior, y el percentil 75, más el producto de 1.5 veces el rango intercuartílico para el límite superior.

En general, de acuerdo con el boxplot de la figura 8, los datos de cada una de las diferentes estaciones se encuentran comprendido dentro el rango intercuartílico (P25 y P75), aunque estaciones como Aranjuez, Corneta, Esquipulas, Majada, Muy muy, Quebrada honda, Raúl González, San Dionisio, San Ramón y Sébaco presentan valores atípicos (outlier), lo que implica una alta variabilidad climática en dichas estaciones.

El comportamiento de la precipitación mensual en la subcuenca, es similar al patrón que prevalece en la región del Pacífico y Central. La precipitación comienza y aumenta en el mes de mayo, decayendo a mediados del mes de julio y agosto durante la canícula, para aumentar nuevamente a partir del mes de septiembre, cuando alcanza su máximo valor.

En el mes de octubre la precipitación media decrece ligeramente respecto al mes de septiembre. No obstante, el mes de octubre es uno de los meses con mayor dispersión, por lo que en ciertos años es posible que este sea el mes más lluvioso del año.

A partir del mes de noviembre, empieza a decrecer la precipitación hasta obtenerse los valores más bajos en el mes de abril. Los boxplots de cada uno de los meses sugiere la presencia de valores atípicos, lo que significa que, algunos valores sobrepasan 1.5 veces el rango intercuartílico sobre el percentil setenta y cinco (P75) del conjunto de datos.

Los primeros 4 meses tienen un comportamiento con cola hacia la derecha, mientras los meses comprendidos desde mayo hasta octubre se acerca a una

distribución normal. Los meses de noviembre y diciembre tiene un comportamiento entre el primer grupo (primeros meses) y el segundo grupo (ver figura 9).

Las figuras 10, 11, 12 y 13 representan el Índice de Desviación de Precipitación (IDP) de cada una de las diferentes estaciones. La línea *negra* representa el valor de la *media estandarizada*, la línea *verde* representa el valor establecido para una *sequía débil* (Reducción del orden de $15 < X < 30$ %), la línea *naranja* representa el valor asignado para una *sequía moderada* (Reducción del orden de $30 < X < 45$ %) y, por último, la línea *roja* representa el valor correspondiente a una *sequía severa* (Reducción del orden de $X > 45$ %).

En 1972, las estaciones de Sébaco, Majada, Darío y Aguas zarcas, presentaron sequía severa; mientras las estaciones de San Ramón y Labranza exhibieron sequía moderada. Las estaciones de San Dionisio, Esquipulas y Mascota se clasificaron como sequía débil en ese año. Las demás estaciones con registro en este año no sufrieron sequía alguna.

En 1977, la estación de la Majada presentó sequía severa, al observarse una reducción de la precipitación respecto a la media mayor del 45 %. Las estaciones de Labranza, Tierra Azul, Esquipulas, San Ramón, Terrabona, Sébaco y Aguas Zarcas presentaron sequía débil.

Sin embargo, 4 estaciones presentaron en ese año sequía moderada (Reyna, Sébaco, San Ramón y Darío). Se identificó 3 estaciones con sequía débil en las estaciones de Labranza, Esquipulas, y Majada.

En 1991, la sequía severa afectó a 3 estaciones: Reyna, Corneta y Quebrada honda; mientras la sequía moderada afectó a 4 estaciones: Labranza, San Dionisio, Majada y Raúl González durante ese mismo año. Cabe destacar que, en este año 10 estaciones no registraron datos, posiblemente por los cambios políticos que vivía en ese entonces Nicaragua.

En 1992, la sequía afectó a la subcuenca, pero esta vez con menos intensidad, ya que solo la estación de San Dionisio se clasificó como sequía severa. No obstante, estaciones tales como Terrabona, Sébaco, Corneta, Aguas Zarcas y Raúl González presentaron sequía moderada.

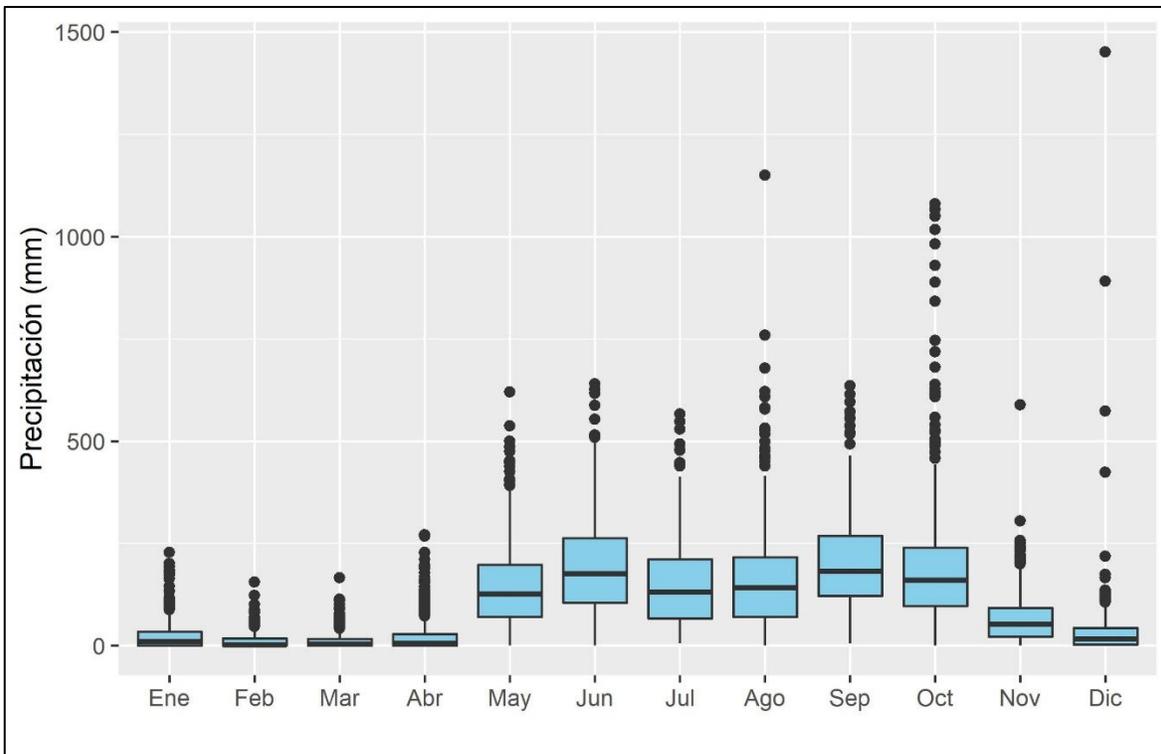


Figura 9. Boxplot del comportamiento de Precipitación Mensual promedio de las Estaciones.

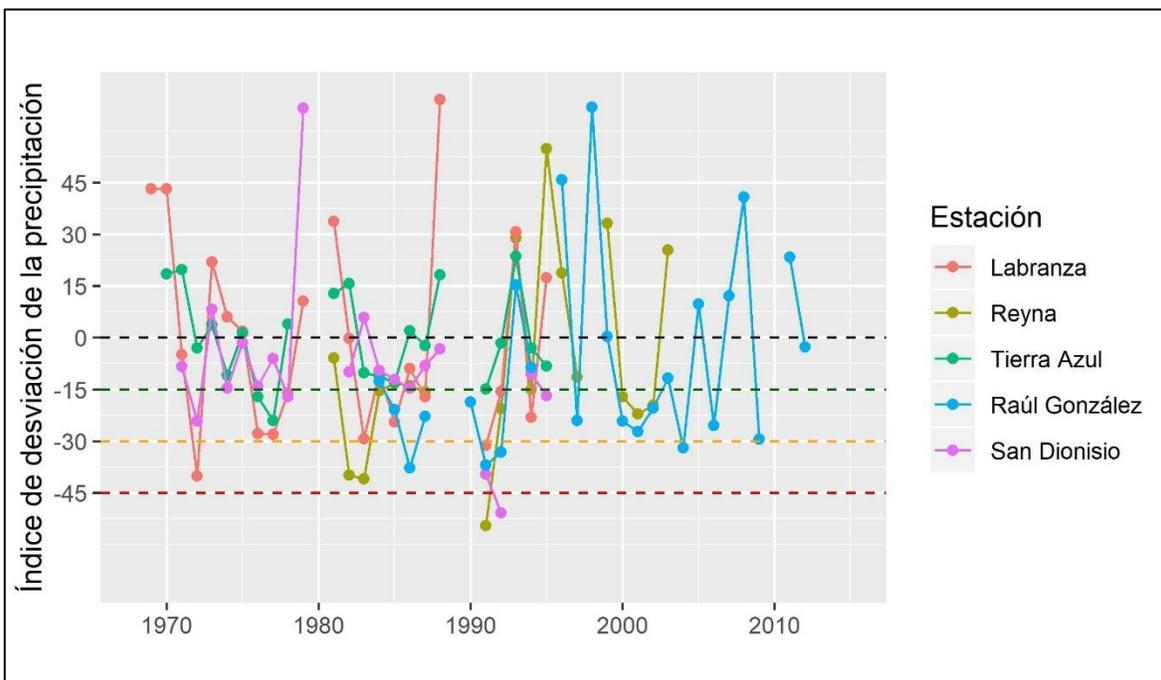


Figura 10. Índice de Desviación de Precipitación (IDP) de las estaciones Labranza, Reyna, Tierra Azul, Raúl González y San Dionisio.

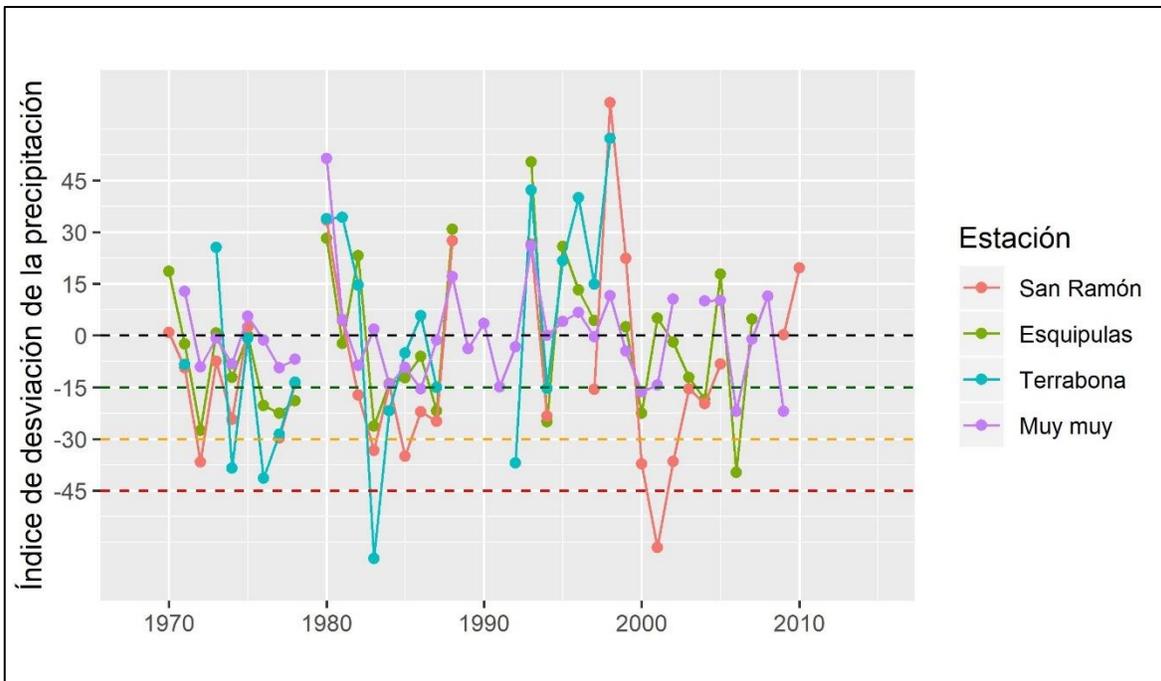


Figura 11. Índice de Desviación de Precipitación (IDP) de las estaciones Esquipulas, San Ramón, Terrabona y Muy muy.

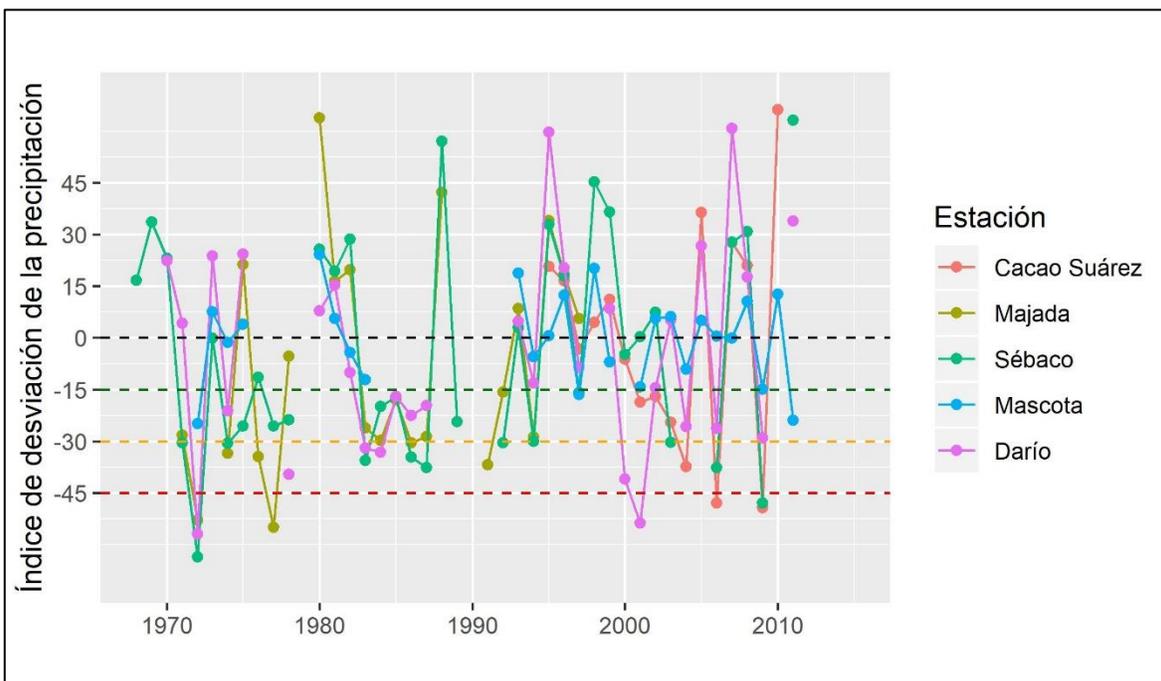


Figura 12. Índice de Desviación de Precipitación (IDP) de las estaciones Majada, Cacao de los Suárez, Sébaco, Darío y Mascota.

El restante de estaciones no se clasificó en algunos de los rangos establecidos de sequía.

En 1983, solamente una estación es clasificada como sequía severa (Terrabona).

Las demás estaciones manifestaron sequía débil, a excepción de la estación de Muy muy y Tierra Azul. En este año, las estaciones de Esquipulas, San Ramón, Mascota, Cacao de los Suárez, Darío, Mascota, Quebrada honda y Santa Lastenia, no presentaron registro alguno.

En el 2001, las estaciones de San Ramón, Darío, Corneta y Quebrada honda mostraron sequía severa. Sin embargo, estaciones Esquipulas, Muy muy, Sébaco y Mascota no presentaron sequía alguna, al no reducirse la precipitación por debajo del 15 %. Las demás estaciones con datos en dicho año presentaron sequía débil. Es importante recalcar que ninguna estación se clasificó como sequía moderada.

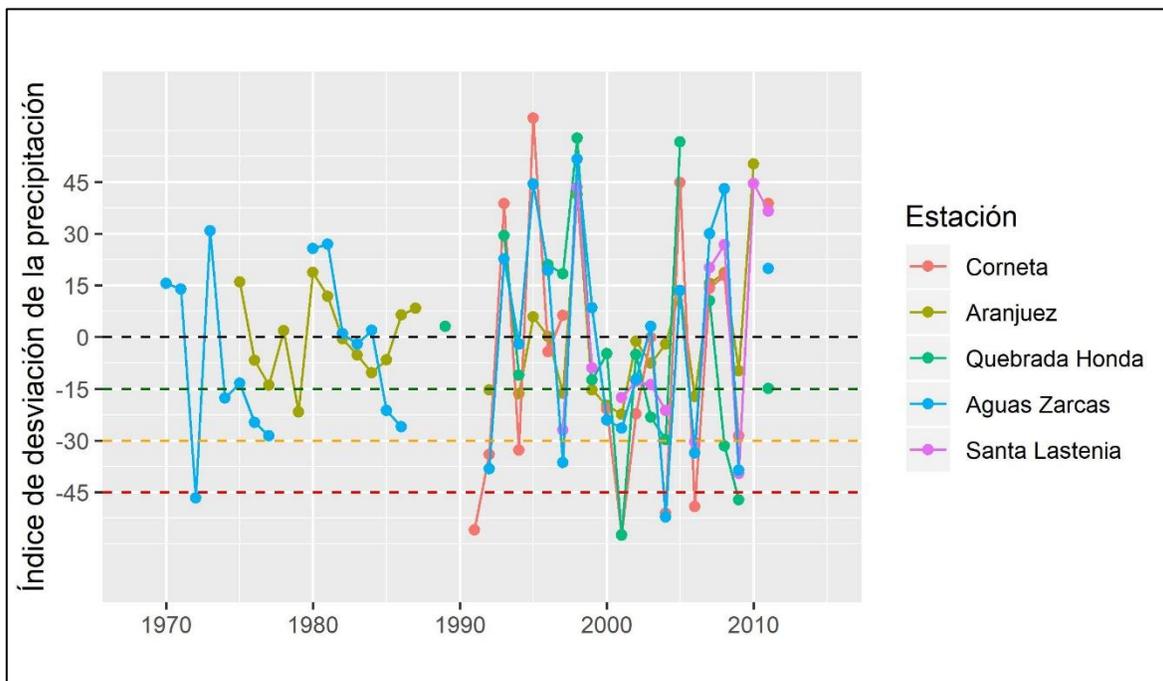


Figura 13. Índice de Desviación de Precipitación (IDP) de las estaciones Aranjuez, Corneta, Quebrada honda, Santa Lastenia y Aguas Zarcas.

Por su parte, en el 2004 las estaciones Corneta y Aguas Zarcas registraron precipitaciones inferiores a la media histórica por el orden del 45 % o más (sequía

severa), acompañadas por dos estaciones que presentaron sequía moderada (Cacao de los Suárez y Raúl González). El resto de estaciones se clasificó como sequía débil, a excepción de Muy Muy, Mascota y Aranjuez.

En el 2006, exceptuando la estación Mascota, las estaciones presentaron algún tipo de sequía. Cacao de los Suárez, Corneta y Quebrada honda, se clasificaron como sequía severa, mientras Esquipulas, Sébaco, Santa Lastenia y Aguas Zarcas se clasificaron como sequía moderada.

En el 2009, en las estaciones de Cacao de los Suárez, Sébaco y Quebrada honda se estableció sequía severa. Por otro lado, Aguas zarcas y Santa Lastenia se clasificaron como sequía moderada. Las demás estaciones registraron precipitaciones entre el 15 % y 30 % de déficit de precipitación, excluyéndose las estaciones de San Ramón, Aranjuez y Mascota.

4.1.1.2 Evapotranspiración

La figura 14 muestra la evapotranspiración potencial media anual del área de estudio. La tendencia en general del comportamiento de la evapotranspiración en la sub cuenca, es el de disminuir a medida que se acerca a la parte norcentral de la sub cuenca, condicionado por las temperaturas que predominan en las montañas de la cordillera Dariense, en relación con las partes bajas de la subcuenca.

Este comportamiento sigue el principio termométrico vertical (gradiente adiabático) que, según Silvac, (2002), explica la disminución de la temperatura media en orden de 6°C por cada 1,000 metros. Las máximas tasas de evapotranspiración se encuentran en la zona oeste de la sub cuenca, donde el régimen de precipitaciones es menor respecto a otras áreas de la sub cuenca.

Se registra un descenso desde la década de los 70's hacia la década de los 80's en la mayoría de las estaciones. Las estaciones de Esquipulas y Muy muy sufrieron un descenso por el orden del 1.32 % y 0.19 % respectivamente.

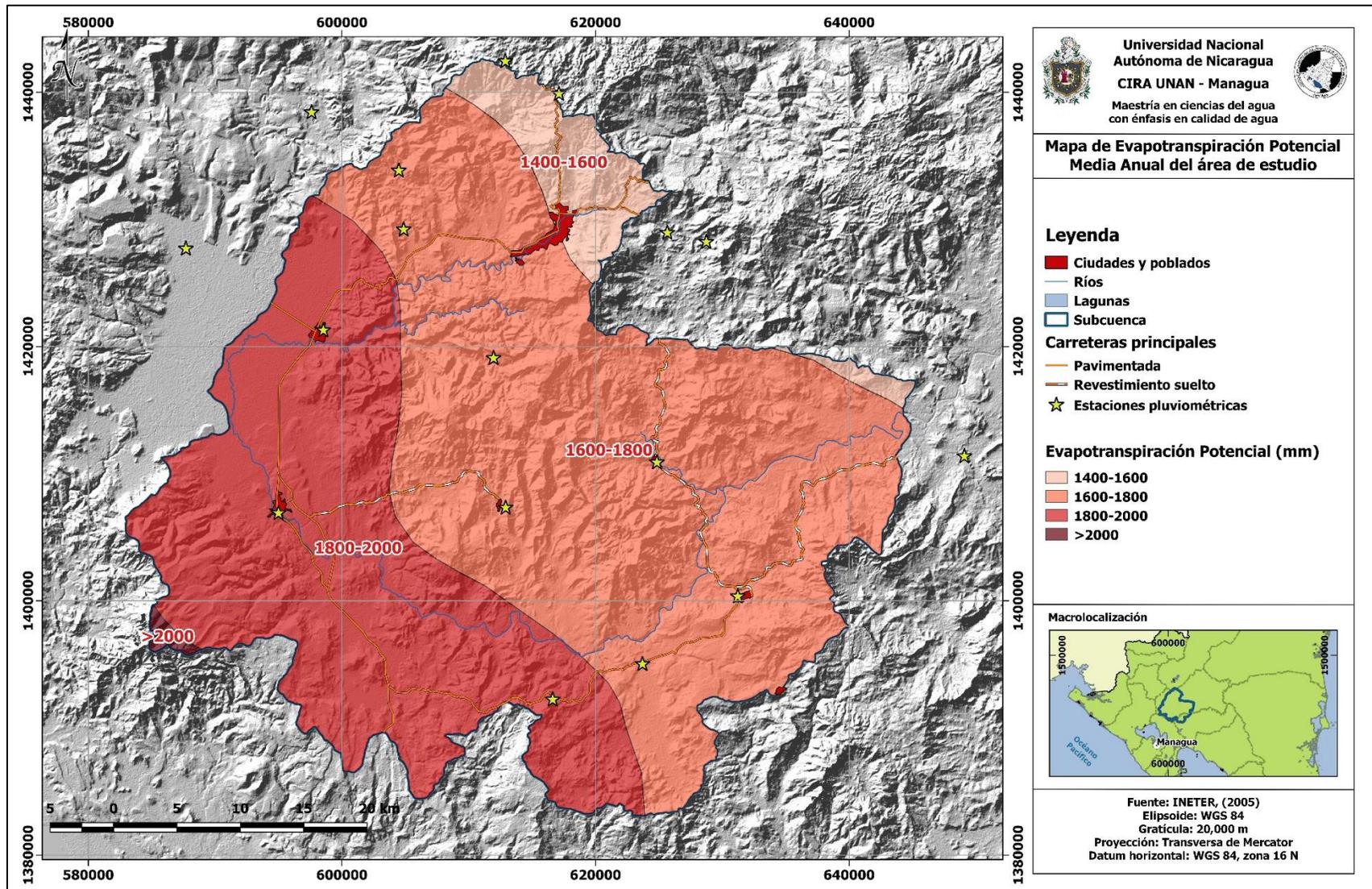


Figura 14. Mapa de Evapotranspiración Potencial Media Anual del área de estudio.

Por otro lado, la estación de San Ramón registró un aumento del 1.61 %. Un aumento importante de la evapotranspiración se da en la década de los 80's hacia los 90's, donde la evapotranspiración de las estaciones de Muy muy y Raúl González aumentaron en 3.44 % y 4.15 % respectivamente.

Al contrario del análisis de la precipitación promedio anual y el caudal, la evapotranspiración debe analizarse como un aumento respecto a la media, bajo el supuesto que este indicador empeora el fenómeno de la sequía al extraer agua del sistema suelo planta.

Pocos años registran un aumento en la evapotranspiración de dos o más estaciones simultáneamente (Esquipulas y San Ramón). Tal suceso solo ocurrió en 1983 y 1987. Años tales como 1970, 1973, 1983, 1987, 1988 registraron un aumento por encima del 3.5 % respecto a la media en la estación de Esquipulas; mientras la estación de Raúl registró aumentos en 1991, 1992, 2003, 2009 y 2012. La estación de Muy muy en 1995, 1998, 1999, 2005 sobrepasó el 3.5 % respecto a la media.

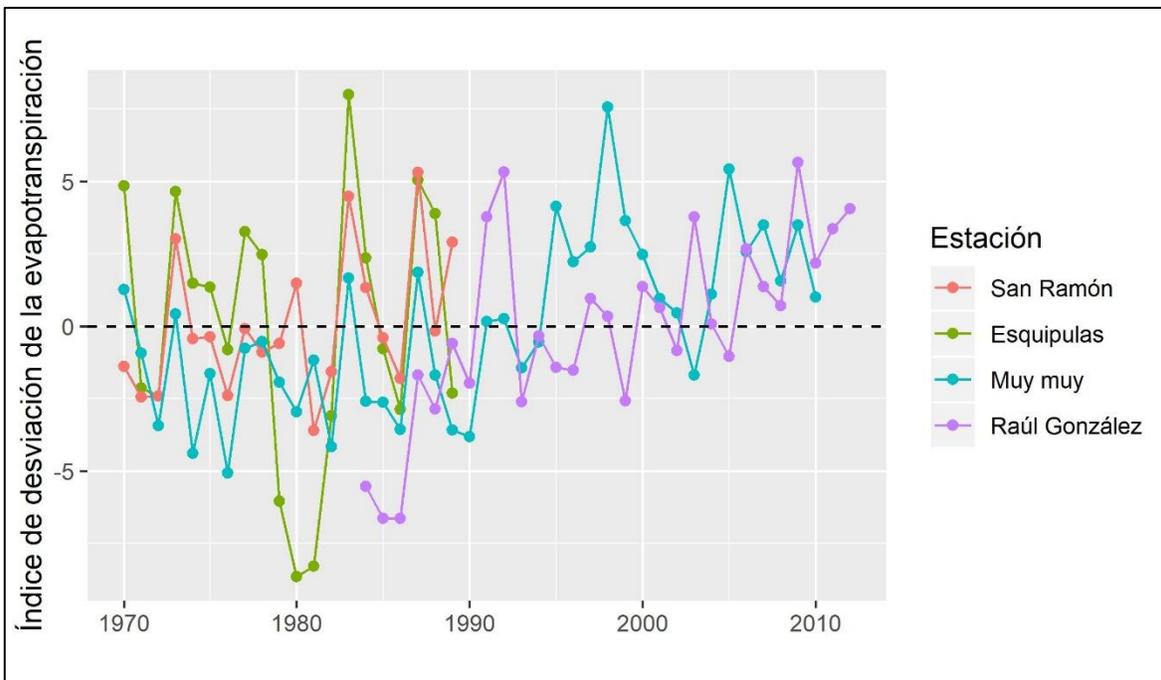


Figura 15. Índice de Desviación de Evapotranspiración Potencial Anual (IDET) de las estaciones Esquipulas, San Ramón, Muy muy y Raúl González.

4.1.2. Sequía agrícola

Para el balance hídrico de suelos se realizó tomas de muestras de suelo y pruebas de infiltración en los sitios elegidos descritos en el subacápite 3.2.

La figura 16 representa los resultados obtenidos de la recolección de muestras de suelo de acuerdo a su textura. Los valores, se han utilizados para estimar la capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).

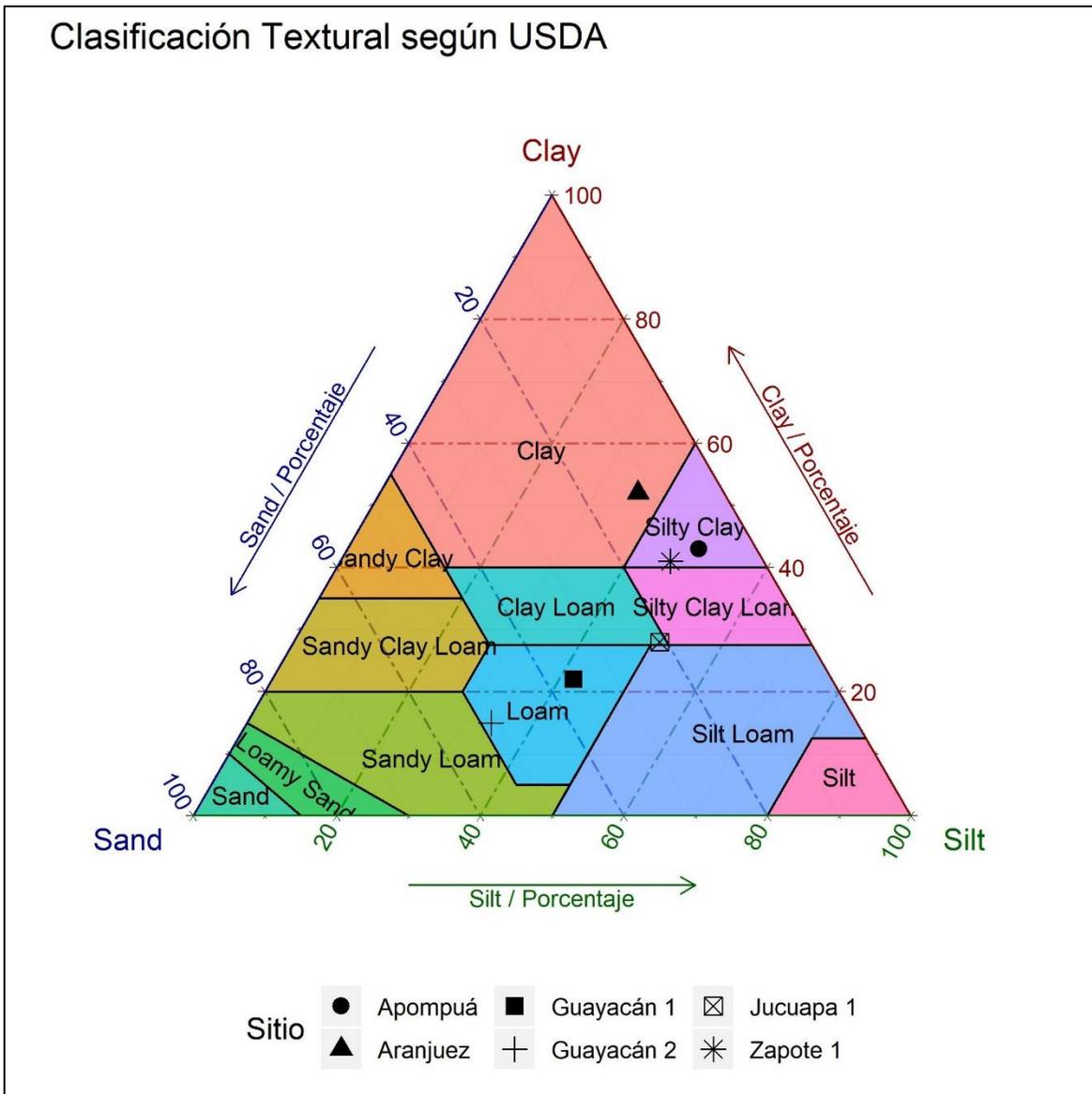


Figura 16. Triángulo textural de suelo según USDA con los datos levantados en campo. Fuente: Elaboración propia.

Nótese que los sitios denominados Zapote y Apompuá se clasifican, según su textura como suelos limosos arcillosos, mientras los sitios denominados Jucuapa y Guayacán se clasifican como suelos Franco arcilloso y Franco respectivamente. Por último, el sitio denominado Aranjuez se clasificó, según su textura como suelo arcilloso. De acuerdo con esta clasificación se pudo estimar los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente contenidos en cuadro 11:

Cuadro 11. Valores de Capacidad de Campo, Punto de Marchitez Permanente y Densidad Aparente del Suelo de las localidades en estudio

Localidad	Capacidad de campo (%)	Punto de Marchitez Permanente (%)	Densidad del suelo (g/cm ³)	Infiltración básica (mm/h)
Apompuá	27.75	15.54	1.35	4.80
Aranjuez	26.19	14.38	1.20	8.17
Guayacán	23.99	12.76	1.50	44.24
Jucuapa	33.50	19.79	1.40	32.41
Zapote	28.66	16.21	1.40	24.87

Fuente: Elaboración propia.

El máximo valor de infiltración básica se midió en el sitio denominado Guayacán, mientras el valor mínimo se registró en el sitio denominado Apompuá.

Los valores de capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente e infiltración, en conjunto con los datos de recopilados en campo de vegetación y pendiente, constituyen los elementos de entrada (input) para el balance hídrico de suelos. Así mismo, los valores de precipitación y evapotranspiración fueron tomados de la estación más cercana al sitio de estudio e incorporados al balance.

Para el sitio denominado Apompuá, se recurrió a los datos de precipitación y evapotranspiración (calculada), de la estación Raúl González ubicada a 15.4 km de distancia en dirección noroeste (NO) del sitio. Aunque un poco lejana, se eligió debido al número de registro y continuidad que presenta esta estación, así como, por la similitud de condiciones climáticas a la estación más cercana al sitio de estudio (Estación de Sébaco).

Se seleccionaron un total de 27 años, comprendido entre los años de 1984 y 2012, con saltos en el tiempo de 1987 a 1990.

Se procedió a correlacionar los valores de precipitación mensual de la estación más cercana, versus el resultado de la humedad del suelo final obtenido del balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky (2006) para cada sitio analizado.

La figura 17 representa los resultados obtenidos de la correlación para el sitio Apompuá, siendo la línea de color naranja el criterio propuesto por Kulik (1962) citado por Valiente (2001), de 19 mm en los primeros 20 cm, mientras la línea azul, establece la capacidad de campo estimada. Debido a las modalidades de siembra predominantes de los cultivos que dependen netamente de la lluvia en el área de estudio, se eligió los meses entre mayo hasta octubre para ser analizados.

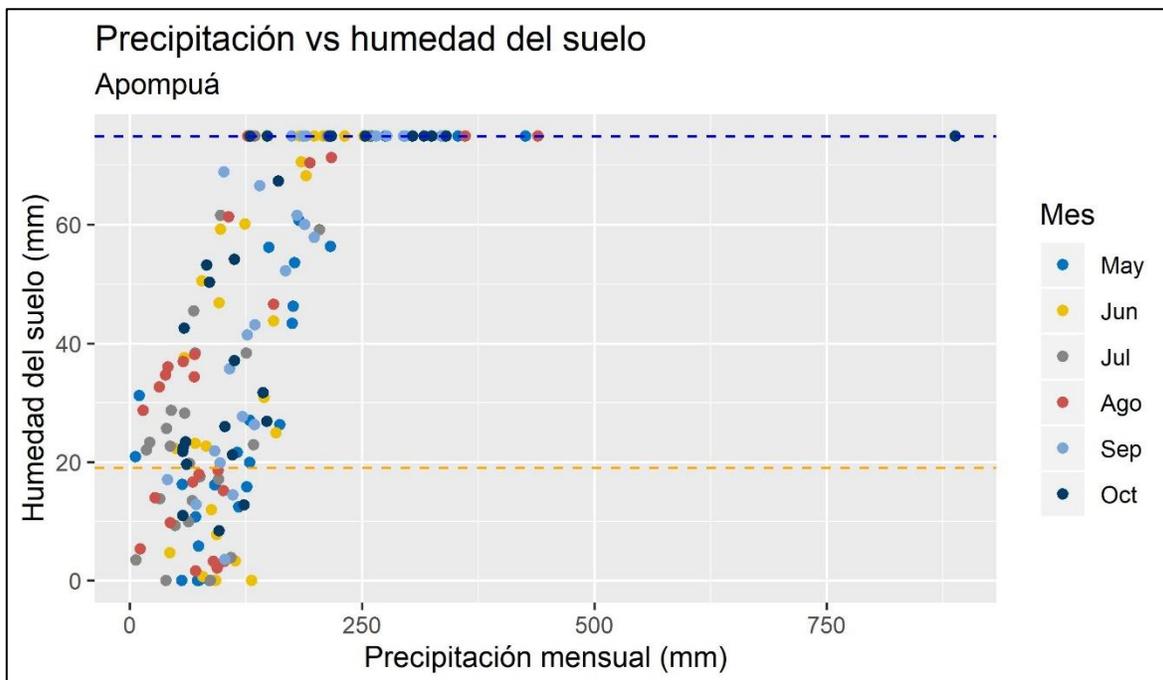


Figura 17. Humedad de suelo final (HSf) del punto denominado Apompuá. Fuente: Elaboración propia.

Nótese que los meses con más tendencia a encontrarse en sequía agrícola (valores inferiores a 19 mm) son los meses de mayo, julio y agosto, mientras los

meses de septiembre y octubre son los menos afectados por dicha amenaza. Para el mes de mayo se contabilizó un total de 11 años en el cual la humedad del suelo final (HSf) es igual o inferior a 19 mm, constituyendo el 40.74 % de los años evaluados. Para el mes de junio, se contabilizó un total de 7 años, mientras para los meses de julio y agosto se contabilizó un total de 11 años por cada mes, representando el 25.93 %, 40.74 % y 40.74 % respectivamente. Por su parte, los meses de septiembre y octubre presentaron la cantidad de 5 y 4 años con humedad de suelo final por debajo de 19 mm, lo que representa el 18.52 % y 14.81 % respectivamente.

Cabe destacar que cuando en un año en particular se presentó la sequía agrícola, ya sea en el mes de septiembre u octubre, este año posteriormente se clasificó como sequía meteorológica moderada. Tal situación es posible, debido a que septiembre y octubre constituyen los meses con mayor precipitación del sitio y que, por tanto, una disminución considerable de la precipitación, repercute de manera significativa tanto a nivel de precipitación anual, como de contenido de humedad en el suelo en los meses mencionados.

Para el sitio denominado Aranjuez se recurrió a los datos de precipitación de la estación Aranjuez (606 m del sitio que se realizó la prueba de infiltración) y los datos de evapotranspiración (calculada) de la estación San Ramón ubicada a 11.1 km de distancia en dirección noreste (NE) del sitio. Se seleccionaron un total de 9 años comprendido entre 1978 y 1987, con saltos en el tiempo de 1978 a 1980.

En figura 18 se puede observar que, durante el período evaluado, únicamente en tres años durante el mes de mayo la humedad del suelo final es menor o igual a 19 mm, lo que se clasifica como sequía agrícola. Cabe destacar que durante el periodo evaluado solo un año presentó sequía clasificada como débil.

Para el sitio denominado Zapote se recurrió a los datos de precipitación de la estación San Dionisio, localizada a 7.08 km en dirección sur (S). Los datos de evapotranspiración (calculada) se obtuvieron de la estación San Ramón ubicada a 11.34 km de distancia en dirección norte (N) del sitio. Se seleccionaron un total de 13 años, comprendido entre 1978 y 1987, con saltos en el tiempo de 1974 a 1978,

de 1978 a 1980 y de 1980 a 1982.

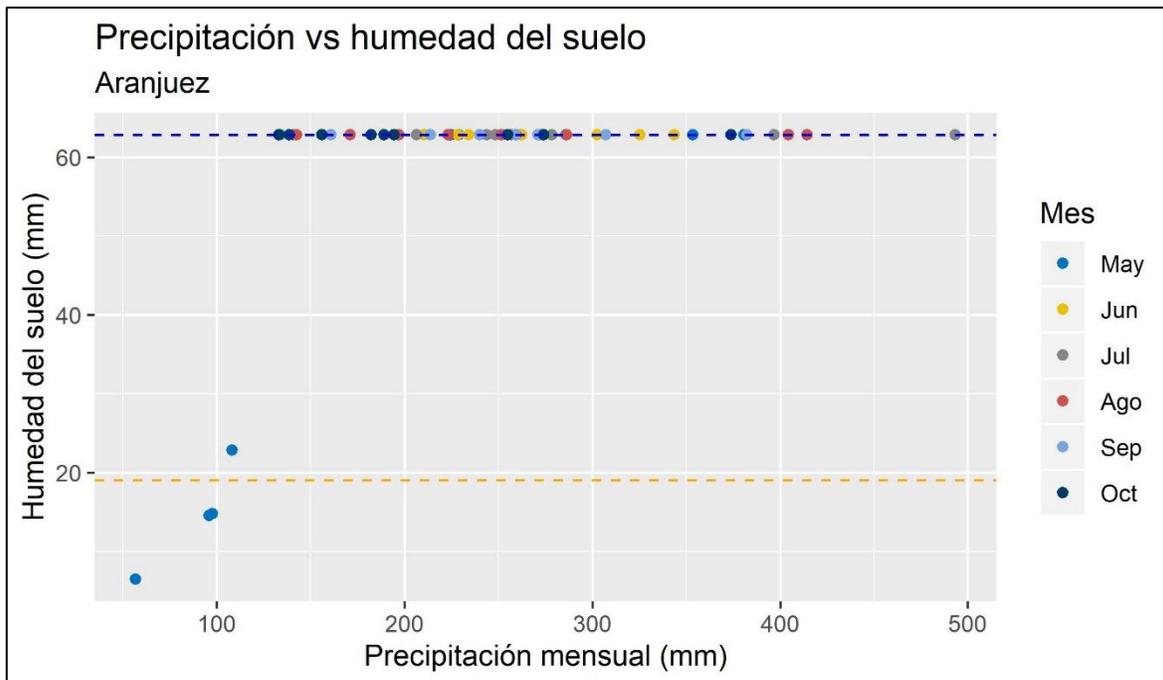


Figura 18. Humedad de suelo final (HSf) del punto denominado Aranjuez. Fuente: Elaboración propia.

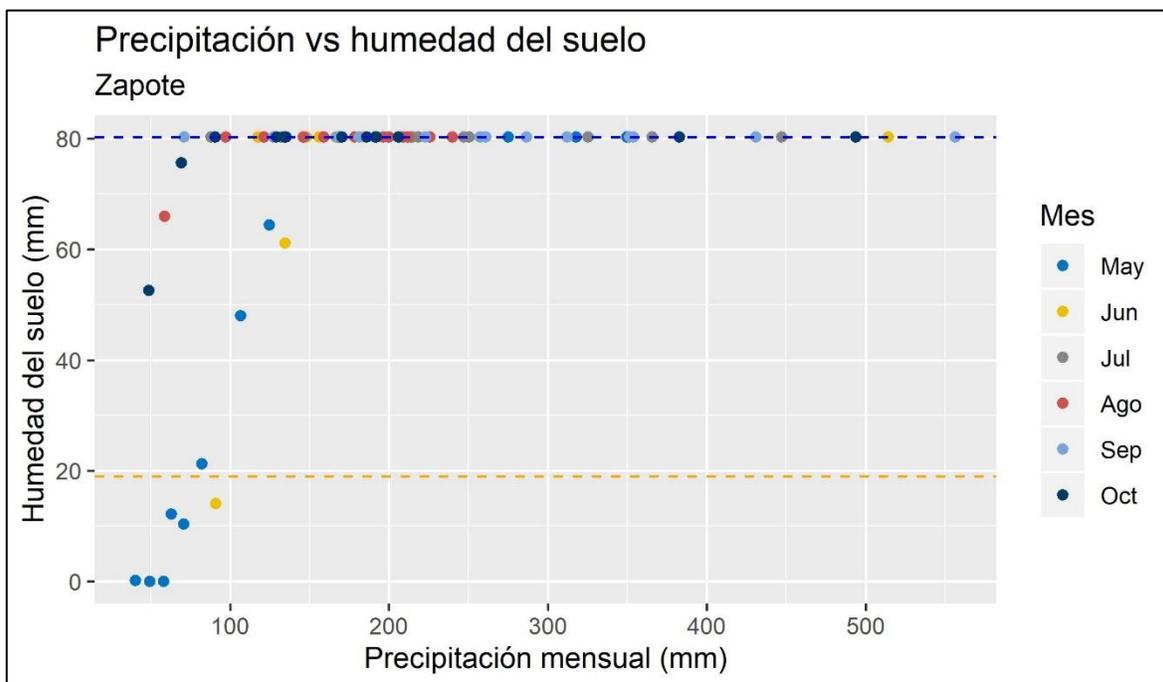


Figura 19. Humedad de suelo final (HSf) del punto denominado Zapote. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 19 se puede observar que durante 5 años en el mes de mayo la

humedad del suelo final fue menor o igual a 19 mm, mientras únicamente en un (1) año en el mes de junio no se logró superar dicho valor. Cabe destacar que, durante el período evaluado apenas ocurrió una sequía, la cual se clasificó como débil.

Para el sitio denominado Guayacán se recurrió a los datos de precipitación de la estación Quebrada honda, la cual se localiza a 3.60 km en dirección noroeste (NO). Los datos de evapotranspiración (calculada) se obtuvieron de la estación Raúl González ubicada a 20.10 km de distancia en dirección oeste (O) del sitio. Se seleccionaron un total de 20 años, comprendido entre 1991 y 2011, con saltos en el tiempo de 1991 a 1993.

Los meses con más tendencia a la sequía agrícola (valores inferiores a 19 mm) son mayo, junio y julio, mientras los meses de septiembre y octubre son los menos afectados por esta amenaza. Para el mes de mayo, se contabilizó un total 10 años, en los cuales, la humedad del suelo final es menor o igual a 19 mm, constituyendo el 50 % de los años evaluados.

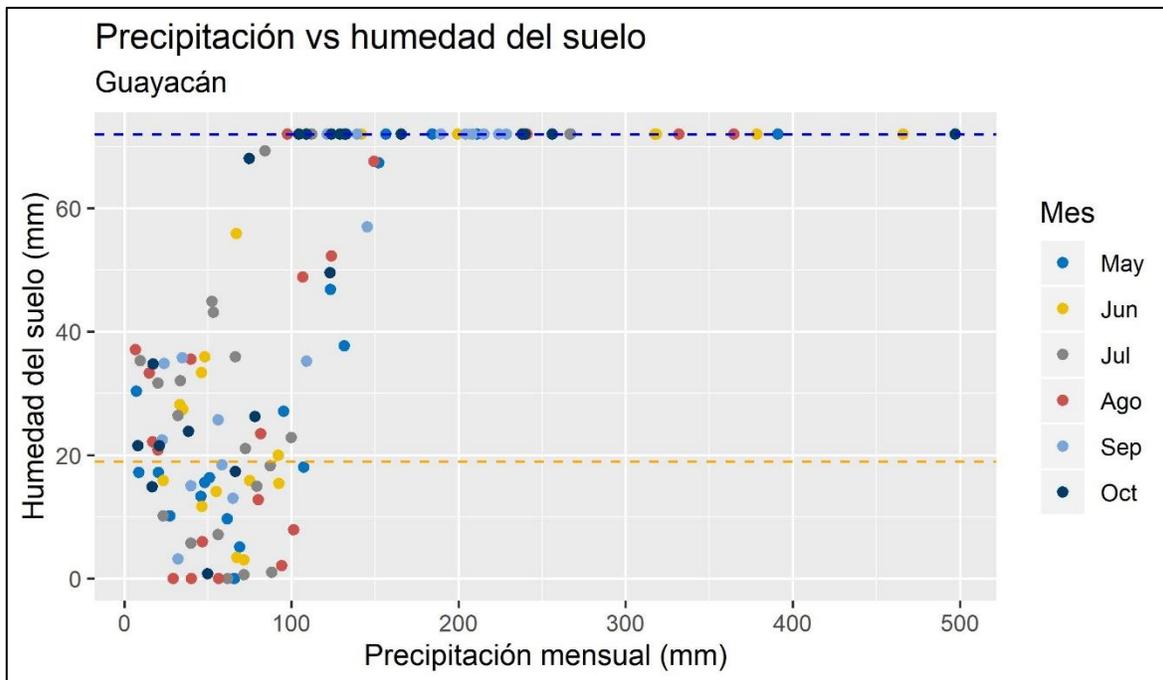
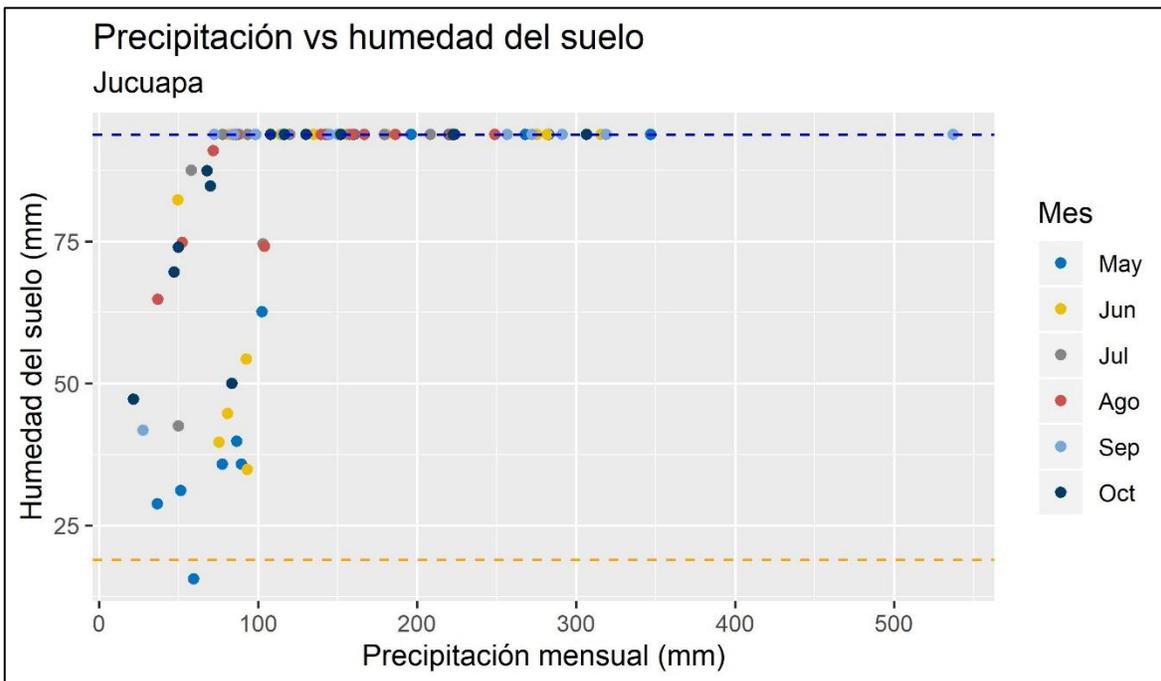


Figura 20. Humedad de suelo final (HSf) del punto denominado Guayacán. Fuente: Elaboración propia.

Para los meses de junio y julio se contabilizó un total de 8 años cada uno, representando el 40 % de la serie de observación evaluada. En el mes de agosto el 35 % de la serie de tiempo evaluada presentaba sequía agrícola, mientras, en los meses de septiembre y octubre representan el 20 y 15 % respectivamente.

Cabe destacar que, cuando en un año en particular se presentó sequía agrícola en el mes de septiembre, este se clasificó como sequía meteorológica severa. Por tanto, eventos de sequía meteorológica severa se asocian con sequías agrícolas en el sitio en cuestión.

Para el sitio denominado Jucuapa se recurrió a los datos de precipitación de la estación Labranza, la cual se localiza a 5.84 km en dirección suroeste (SO). Los datos de evapotranspiración (calculada) se obtuvieron de la estación San Ramón ubicada a 11.15 km de distancia en dirección noreste (NE) del sitio. Se seleccionaron un total de 13 años, comprendido entre 1971 y 1988, con saltos en el tiempo de 1974 a 1978, y de 1978 a 1981.



En la figura 21 se puede observar, que únicamente en un año de la serie evaluada durante el mes de mayo la humedad del suelo final fue menor a 19 mm, por lo que se dio la sequía agrícola en dicho momento.

Cabe destacar que durante el período evaluado para la estimación de sequía agrícola ocurrió un total de una sequía moderada (1972), y 6 sequías meteorológicas clasificadas como débil.

4.1.3. Sequía hidrométrica

4.1.3.1. Relación sequía meteorológica e hidrométrica

Si bien se obtuvo datos de tres (3) estaciones hidrométricas del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), solamente se utilizaron datos de dos (2) estaciones. La estación Grande de Matagalpa en Esquipulas se descarta por considerarse que la longitud de datos es insuficiente para efectuar el análisis propuesto en el presente estudio

Para la estación Grande de Matagalpa en Sébaco se contabiliza un total de 135 observaciones. Estas mediciones corresponden a los caudales de los meses de la estación lluviosa (de mayo a noviembre) del período desde 1969 hasta 1988. La estación Grande de Matagalpa en Darío presenta un total de 151 observaciones, que corresponden a los caudales registrados para el período entre los años de 1966 y 1988.

En las figuras 22 y 23 se puede apreciar la relación entre el caudal y la precipitación. Es notorio que los caudales se ven afectados cuando las precipitaciones sufren una importante reducción. La precipitación varía de un lugar a otro, y por tanto de una estación a otra. Es posible inferir como afecta la reducción de la precipitación local sobre el caudal, relacionando estas dos variables. Nótese que la reducción de la precipitación conlleva reducción de caudal, pero sin observarse una relación lineal.

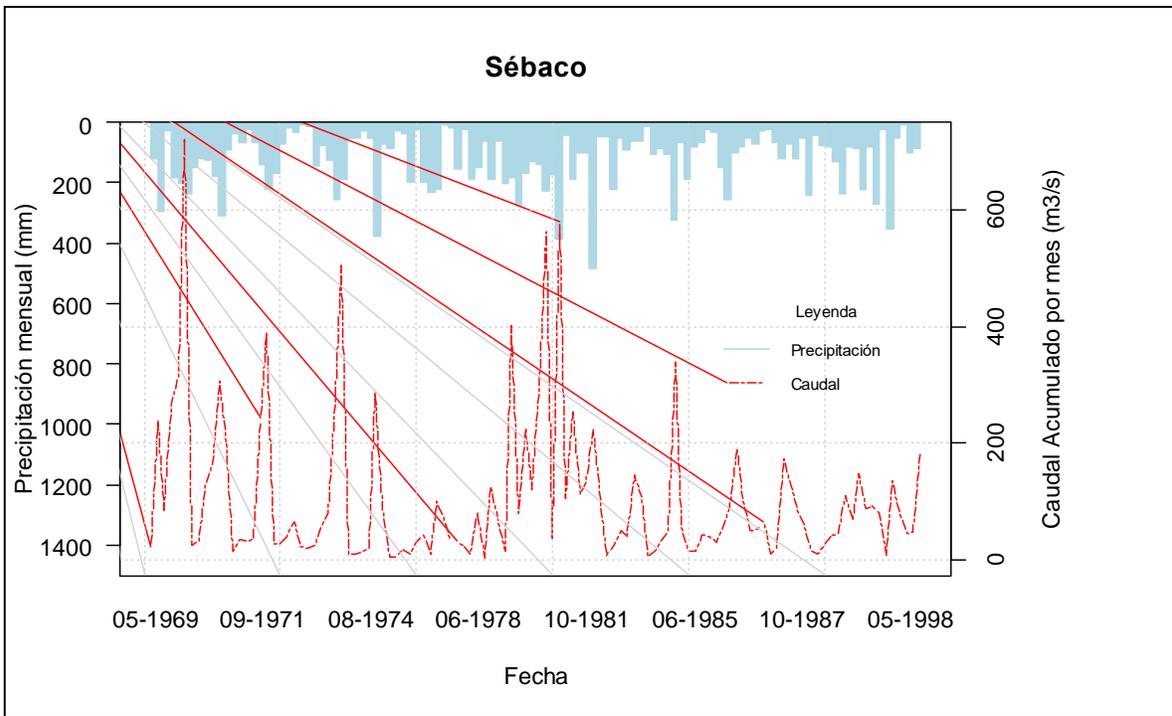


Figura 22. Caudal de la estación hidrométrica Grande de Matagalpa en Sébaco y Precipitación de la estación pluviométrica de Sébaco. Fuente: Elaboración propia.

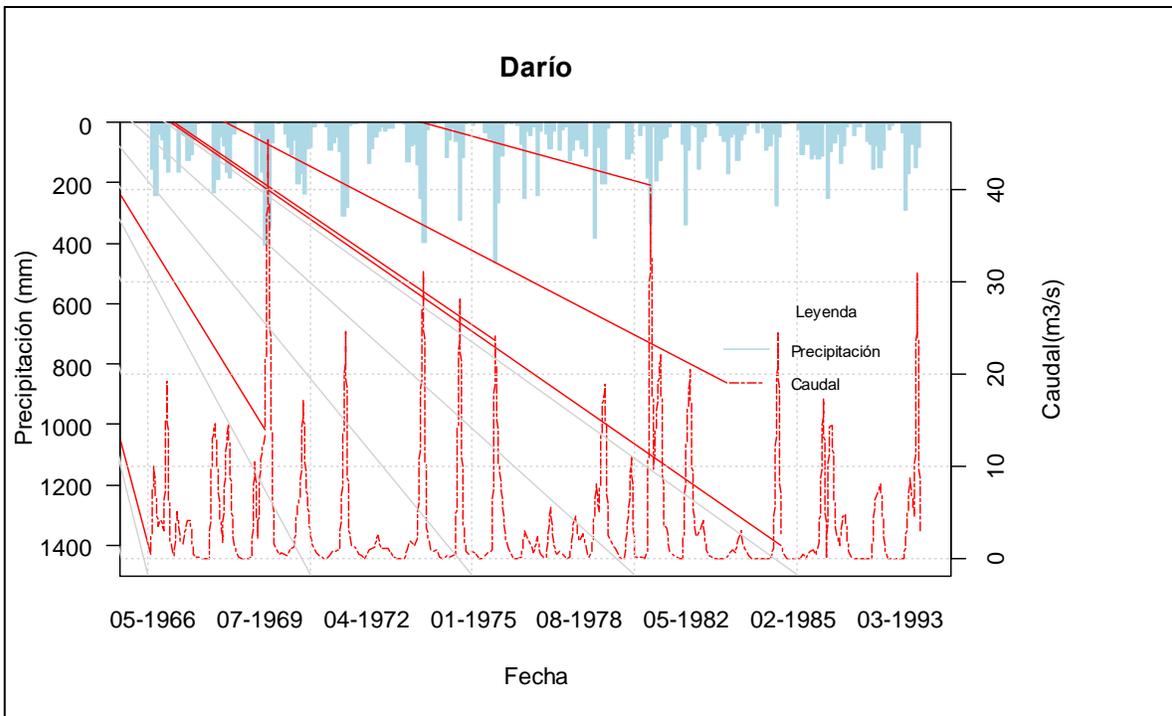


Figura 23. Caudal de la hidrométrica Grande de Matagalpa en Darío y Precipitación de la estación pluviométrica de Darío. Fuente: Elaboración propia.

Se realiza a curva de caudales clasificados o de permanencia en ambos sitios de medición. Se toma como criterio de clasificación si un año presenta sequía meteorológica de moderada a severa o si se clasifica como un año normal.

Es evidente que, en el último grupo, los caudales son mayores para la mayoría de las probabilidades de excedencia. Así, la probabilidad del 50 % de excedencia del caudal para un año con precipitaciones inferiores al 30 % de la norma histórica, es igual a 1.3 m³/s para la estación de Sébaco, mientras para la estación de Darío es igual a 1.18 m³/s.

Por su parte, la probabilidad del 50 % de excedencia del caudal, para un año con precipitaciones normales es de 3.42 m³/s para la estación Sébaco, mientras para la estación Darío es igual a 3.50 m³/s.

Por tanto, tomando en cuenta el 50 % de probabilidad de excedencia, la reducción que sufre el caudal durante la aparición de una sequía meteorológica igual o mayor al 30 % es del 61.99 % para la estación Grande de Matagalpa en Sébaco y 66.29 % para la estación Grande de Matagalpa en Darío.

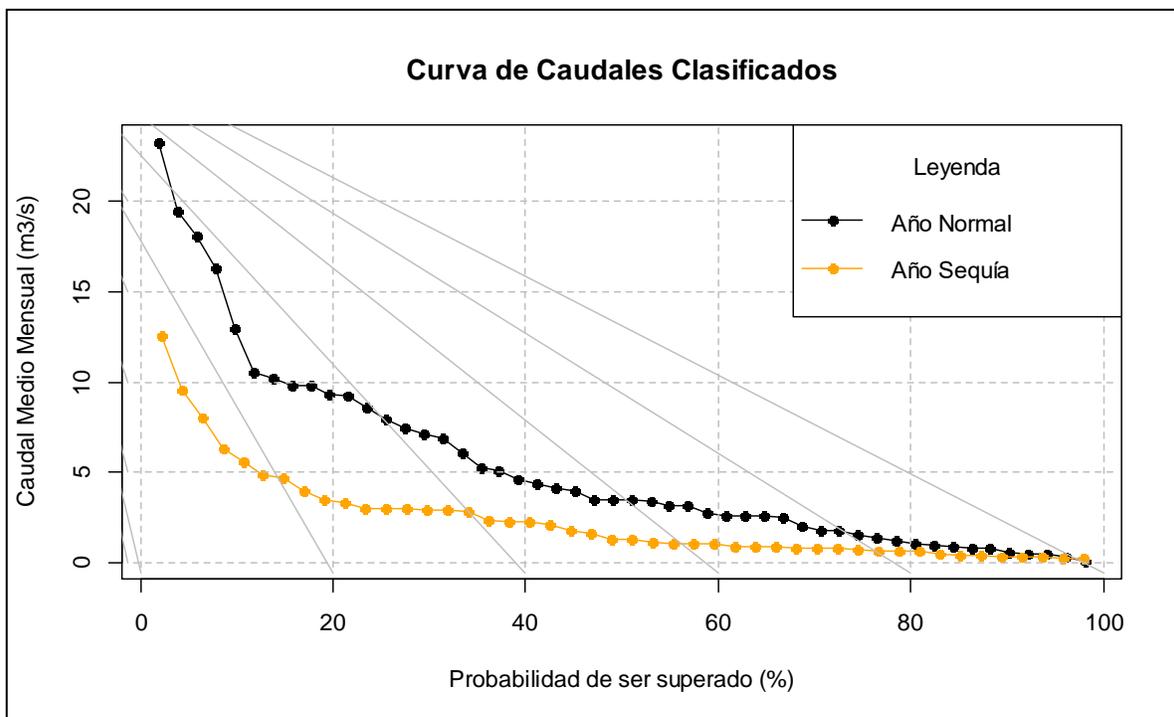


Figura 24. Curva de Caudales Clasificados de la estación Grande de Matagalpa en Sébaco. Fuente: Elaboración propia.

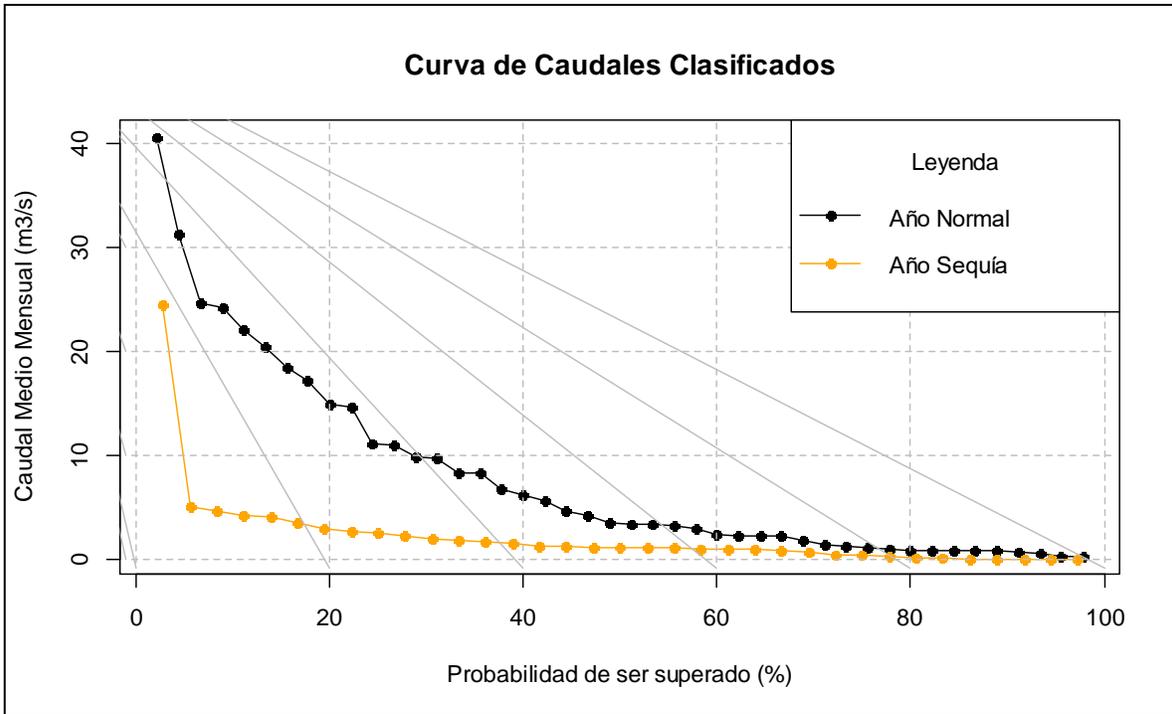


Figura 25. Curva de Caudales Clasificados de la estación Grande de Matagalpa en Darío. Fuente: Elaboración propia.

Según estos resultados, el impacto de la sequía meteorológica es más significativo en la estación Grande de Matagalpa en Darío, que en la estación Grande de Matagalpa en Sébaco. Esto puede ser explicado debido a las que la interacción río y acuífero no es la misma en los sitios evaluados.

4.1.3.2. Interacción río acuífero

La interacción río acuífero ha sido evaluada con una prueba de campo: Seepage. En el área de estudio se efectuaron tres pruebas seepage, a fin de establecer el impacto de la sequía por tramos de río.

El primer seepage se estableció en la entrada del río Grande de Matagalpa al Valle de Sébaco, el segundo a la mitad del transcurso de este por el acuífero y, por último, a la salida del río del valle.

Cuadro 12. Datos obtenidos de pruebas Seepage

Nombre	X	Y	Altitud	Valor inicial (ml)	Valor final (ml)	Tiempo (min)	Q (ml/min)
Sébaco	597727	1420600	483	200	390	15.43	12.311
Horno	591469	1415313	475	300	260	15.016	-2.66
Darío	594467	1407990	451	300	250	15	-3.33

Fuente: Elaboración propia (2013) con base en los datos recopilados en campo.

El signo positivo de la variable “Q” indica que el río gana agua del acuífero; mientras, el signo negativo indica que el río cede agua al acuífero. Estas interacciones son de vital importancia para comprender por qué en ciertas zonas son más afectadas que otras.

Así, en zonas donde el acuífero alimenta al río (en este caso entrada al valle de Sébaco), los efectos de la sequía meteorológica serán menores en relación con zonas donde ocurre lo contrario (Horno y Darío). Ante tal comportamiento, es plausible que ciertas estaciones presenten mayor relación entre las precipitaciones y el caudal.

4.2. PERIODO DE RETORNO DE SEQUÍA: ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIA

4.2.1. Filtrado primario de las observaciones

El filtrado primario se hizo utilizando los datos mensuales otorgados por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 2013). Se comprobó que la mayoría de las estaciones tenían datos faltantes (89.47 % de las estaciones), tanto a nivel mensual como anual.

Se comienza con una inspección preliminar de todas las estaciones,

representando gráficamente sus valores L-CV y L-Kurtosis frente a L-asimetría con el objetivo de obtener una primera aproximación. El cuadro 13 contiene los L-Momentos de las estaciones evaluadas.

Cuadro 13. Valores de los cocientes L-Momentos iniciales de las estaciones

ID	Nombre de la estación	Longitud de registro (años)	Media (I1)	L-CV (t)	L-Asimetría (t3)	L-Kurtosis (t4)
1	Aguas Zarcas	35	882.4029	0.17662296	0.05577845	0.05611674
2	Aranjuez	31	1756.0774	0.09608499	0.20694916	0.12929143
3	Cacao de los Suárez	16	1171.8438	0.18565508	0.01291523	0.10674311
4	Corneta	19	948.3421	0.27112751	0.21071089	0.12464014
5	Darío	35	880.36	0.19841272	0.14201203	0.11747136
6	Esquipulas	33	1302.9606	0.13546219	0.20640357	0.16461038
7	Labranza	24	969.5042	0.16235047	0.19157984	0.07267904
8	Lastenia	13	1562.7	0.17351953	0.13993804	-0.04983013
9	Majada	25	1046.388	0.23321082	0.25571212	0.13505752
10	Mascota	26	1685.6392	0.07496147	-0.04191236	0.11480968
11	Muy muy	37	1530.3189	0.07502175	0.13713685	0.19613206
12	Quebrada honda	21	745.9476	0.27126378	0.11292556	0.17000342
13	Raúl González	27	909.6148	0.19677187	0.34971672	0.1476642
14	Reyna	21	1481.8762	0.19727501	0.22743782	0.16804238
15	San Dionisio	23	1378.8391	0.16951276	0.36655527	0.4303473
16	San Ramón	32	1777.4625	0.21954844	0.36477852	0.30089188
17	Sébaco	54	916.6852	0.19088961	0.18095921	0.10362247
18	Terrabona	22	928.1773	0.18654748	-0.01144573	0.06086322
19	Tierra Azul	22	1552.1182	0.07802604	0.06671004	0.05565661

Fuente: Elaboración propia con base en INETER

Todas aquellas estaciones, donde en ambos gráficos, estén alejado de la nube de puntos, con su centro (media) indicado por el símbolo (+) serán sujeto de análisis, por lo que, al momento de regionalizar, quedaría excluidas si el test estadístico de discordancia lo corrobora.

Es notorio, que la estación la Mascota (Mct), está alejada de la nube de puntos, en el primer gráfico. Estaciones como San Dionisio (Sdns), y Santa Lastenia (Ltn), parecen alejarse significativamente de la media en el gráfico número dos, contenido en la figura 26.

Dado que existen varias estaciones que se alejan de la media, es necesario, por tanto, determinar cuáles estaciones son estadísticamente discordantes mediante la ecuación 20.

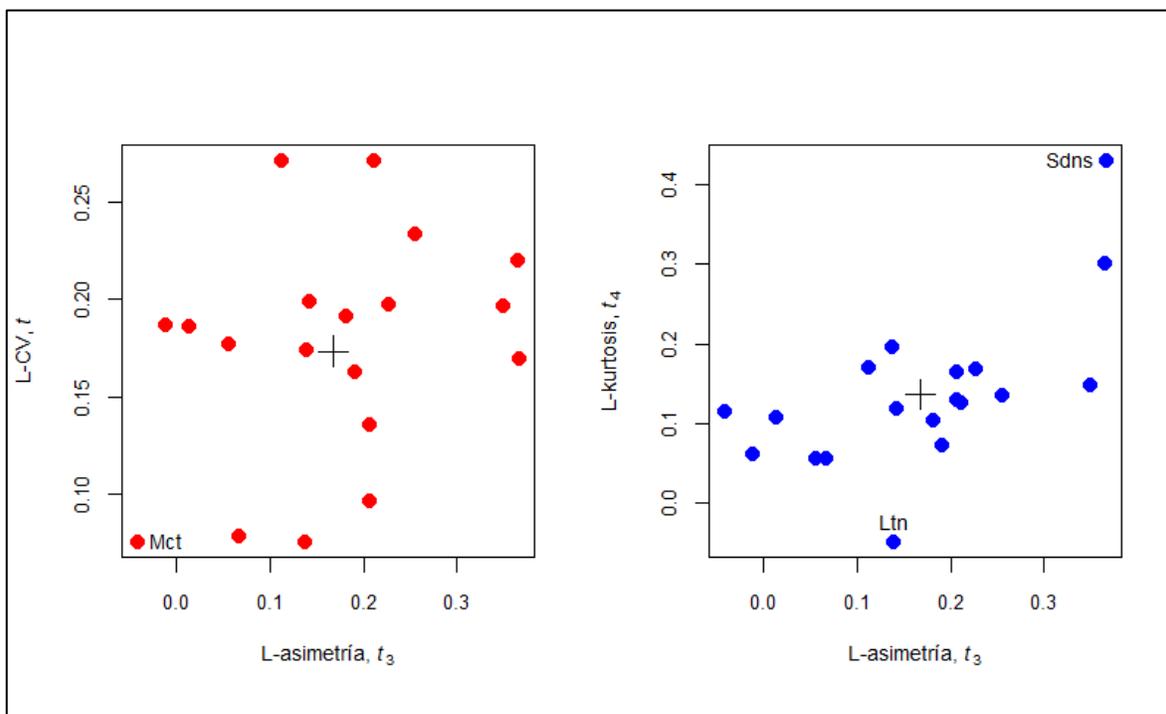


Figura 26. Cociente L-Momentos iniciales de las estaciones en estudio. Fuente: Elaboración propia con base en INETER (2013).

Cuadro 14. Valores de Discordancia iniciales (D_i) de las estaciones en estudio

Estación	D_i	Estación	D_i
Aguas Zarcas	0.3771	Muy muy	1.1902
Aranjuez	0.9423	Quebrada honda	1.7460
Cacao de los Suárez	0.9409	Raúl González	1.2693
Corneta	0.9897	Reyna	0.1128
Darío	0.1112	San Dionisio	3.0684
Esquipulas	0.2572	San Ramón	1.2186
Labranza	0.4182	Sébaco	0.1154
Lastenia	1.7587	Terrabona	1.0258
Majada	0.5201	Tierra Azul	1.0615
Mascota	1.8767	Valor Crítico	3

Fuente: Elaboración propia.

Para quince o más estaciones, el valor crítico de discordancia (D_i) es de 3. Así, la

estación de San Dionisio (3.0684) queda excluida del proceso de Análisis Regional de Frecuencia por considerársela discordantes del resto. Ante esto, es necesario reiterar el proceso de filtrado, sin la estación de San Dionisio. El cuadro 15, contiene los L-Momentos sin la estación de San Dionisio.

Cuadro 15. Valores de los cocientes L-Momentos de las estaciones

ID	Nombre de la estación	Longitud de registro (años)	Media (I1)	L-CV (t)	L-Asimetría (t3)	L-Kurtosis (t4)
1	Aguas Zarcas	35	882.4029	0.17662296	0.05577845	0.05611674
2	Aranjuez	31	1756.0774	0.09608499	0.20694916	0.12929143
3	Cacao de los Suárez	16	1171.8438	0.18565508	0.01291523	0.10674311
4	Corneta	19	948.3421	0.27112751	0.21071089	0.12464014
5	Darío	35	880.36	0.19841272	0.14201203	0.11747136
6	Esquipulas	33	1302.9606	0.13546219	0.20640357	0.16461038
7	Labranza	24	969.5042	0.16235047	0.19157984	0.07267904
8	Lastenia	13	1562.7	0.17351953	0.13993804	0.04983013
9	Majada	25	1046.388	0.23321082	0.25571212	0.13505752
10	Mascota	26	1685.6392	0.07496147	0.04191236	0.11480968
11	Muy muy	37	1530.3189	0.07502175	0.13713685	0.19613206
12	Quebrada honda	21	745.9476	0.27126378	0.11292556	0.17000342
13	Raúl González	27	909.6148	0.19677187	0.34971672	0.1476642
14	Reyna	21	1481.8762	0.19727501	0.22743782	0.16804238
15	San Ramón	32	1777.4625	0.21954844	0.36477852	0.30089188
16	Sébaco	54	916.6852	0.19088961	0.18095921	0.10362247
17	Terrabona	22	928.1773	0.18654748	0.01144573	0.06086322
18	Tierra Azul	22	1552.1182	0.07802604	0.06671004	0.05565661

Fuente: Elaboración propia.

Nuevamente, se hace uso de la gráfica de L-CV y L-Kurtosis frente a L-asimetría para determinar si el conjunto de estaciones puede pasar a la siguiente etapa.

Se puede observar que la estación Mascota aparece nuevamente en el gráfico 1, de la figura 27. Además de ello, estaciones como Santa Lastenia y San Ramón, parecen alejarse de la nube de puntos en la gráfica número dos. En efecto, es necesario aplicar nuevamente el test de discordancia para determinar si estas estaciones tienen un comportamiento estadístico diferente de las demás.

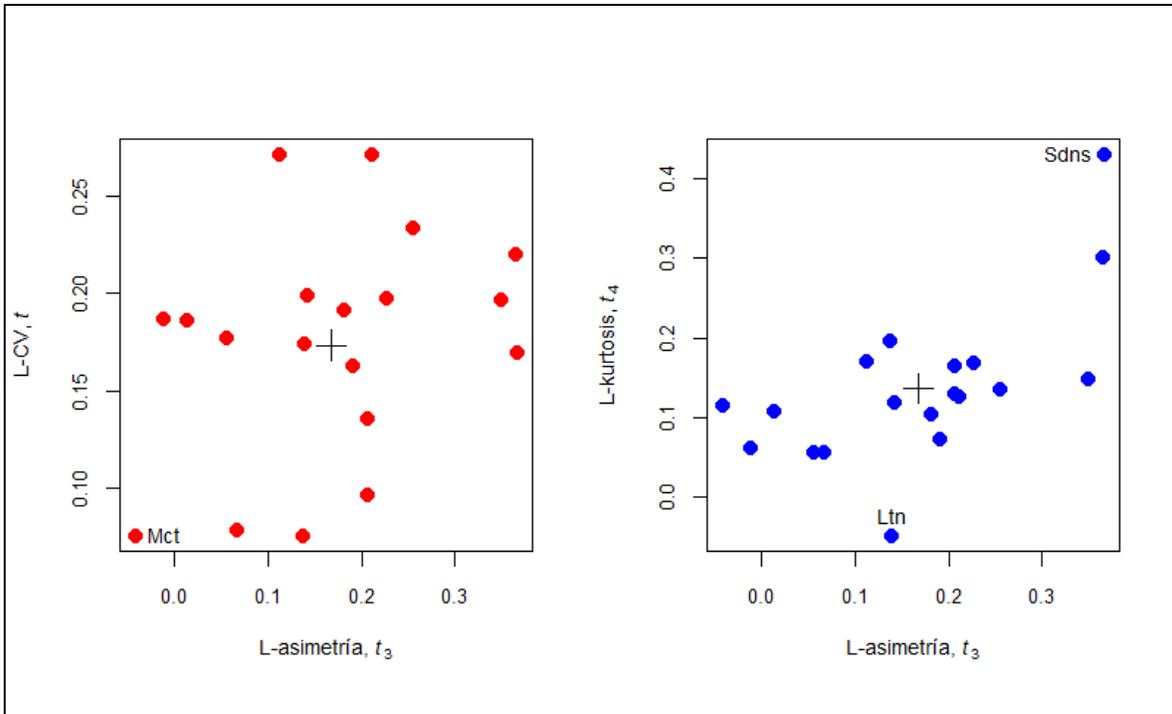


Figura 27. Cocientes L-Momentos de las estaciones previamente filtradas. Fuente: Elaboración propia con base en INETER (2013).

Atendiendo el cuadro 16, el valor crítico sigue siendo 3 para el número estaciones evaluados. Por tanto, ni siquiera la estación de Santa Lastenia con 2.53 se considera discordante, por lo que se puede proceder a la siguiente etapa.

Cuadro 16. Valores de Discordancia D_i de las estaciones

Estación	D_i	Estación	D_i
Aguas Zarcas	0.4197	Mascota	1.8043
Aranjuez	0.9239	Muy muy	1.5531
Cacao de los Suárez	0.8744	Quebrada honda	1.7208
Corneta	0.9201	Raúl González	1.2204
Darío	0.0900	Reyna	0.2033
Esquipulas	0.3791	San Ramón	2.3268
Labranza	0.4166	Sébaco	0.0931
Lastenia	2.5343	Terrabona	1.0173
Majada	0.4834	Tierra Azul	1.0193

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Identificación de regiones homogéneas

Una vez culminada la etapa de filtrado primario de las observaciones se procede a identificar aquellas regiones que poseen atributos similares.

Se realiza un análisis de clúster tomando en cuenta la precipitación media anual, longitud y altitud contenido en el siguiente cuadro:

Cuadro 17. Descriptores físicos de las estaciones

Estación	Longitud (Grados)	PMA (mm)	Altitud (msnm)
Aguas zarcas	-86.1	882.4029	600
Aranjuez	-85.92	1756.0774	1380
Cacao Suárez	-85.93	1171.8438	550
Corneta	-86.04	948.3421	800
Darío	-86.13	880.36	430
Esquipulas	-85.79	1302.9606	520
Labranza	-85.97	969.5042	900
Lastenia	-85.96	1562.7	1240
Majada	-85.86	1046.388	320
Mascota	-85.92	1685.6392	1350
Muy muy	-85.63	1530.3189	320
Quebrada honda	-86.03	745.9476	660
Raúl González	-86.19	909.6148	480
Reyna	-85.81	1481.8762	700
San Ramón	-85.84	1777.4625	650
Sébaco	-86.09	916.6852	480
Terrabona	-85.97	928.1773	600
Tierra azul	-85.55	1552.1182	280

Fuente: Elaboración Propia.

La longitud va desde -85.55 grados (el signo negativo denota que se encuentra en la parte occidental del globo terráqueo) hacia el este (Tierra azul), hasta -86.19 hacia el oeste (Raúl González). La altitud promedio de disposición de las estaciones es de 681.11 msnm, siendo Aranjuez la estación con mayor altitud (1,380 msnm), y Tierra azul la estación con menor altitud (280 msnm). La precipitación media anual de las estaciones evaluadas es de 1,224.91 mm, con un máximo de 1,777.4625 mm (San Ramón) y un mínimo de 745.9476 mm (Quebrada honda).

El algoritmo empleado en el análisis clúster es el método Ward, procedimiento jerárquico aglomerativo, que agrupa las estaciones, de manera que la varianza intragrupal de la estructura formada, sea mínima (Erro, 2011).

El análisis de clúster revela que a medida que el valor de altura se acerca a cero, implica un mayor grado de asociación. De esta manera, es notorio, que en primera instancia existen dos grupos bien definidos.

Estos tienen poca probabilidad que sean clasificadas como regiones homogéneas, ya que su grado de asociación es bajo, explicado por el hecho de que la asociación entre las estaciones, es inversa a la altura del clúster, es decir, a mayor altura, menor grado de asociación existe entre las estaciones. Así, las alturas inferiores a 1,000, son las que se utilizaron para la clasificación de regiones homogéneas.

El dendograma indica que se establecen 3 regiones, nombradas como Norte (Lastenia, Aranjuez y Mascota), Centro (Muy muy, Tierra azul, Cacao de los Suárez, Esquipulas, Reyna y San Ramón) y Valle (Corneta, Labranza, Quebrada honda, Aguas zarcas, Terrabona, Majada, Darío, Raúl González y Sébaco) para facilitar su identificación.

Las regiones propuestas resultantes del análisis de clúster deben someterse al test de heterogeneidad (H1) descrito en la ecuación 23 (3.7.2), para ser validadas como regiones homogéneas.

Una condición indispensable para desarrollar este análisis, es que existan datos disponibles de un número significativo (al menos 5) de estaciones para la estimación de cuantiles a nivel regional y a nivel de estaciones (Álvarez *et al.*, 1999). En vista de esto, muchas regiones formadas por el análisis de clúster no entran el análisis regional de frecuencias basado en L-Momentos.

La región del norte se descartó, por estar conformada por tres estaciones. Dado al conocimiento que se tiene de la zona de estudio, se trasladó la estación "Labranza", desde la región del Valle hacia la región del Centro, mientras la estación "Santa Lastenia" paso de la región Norte hacia la región del Centro.

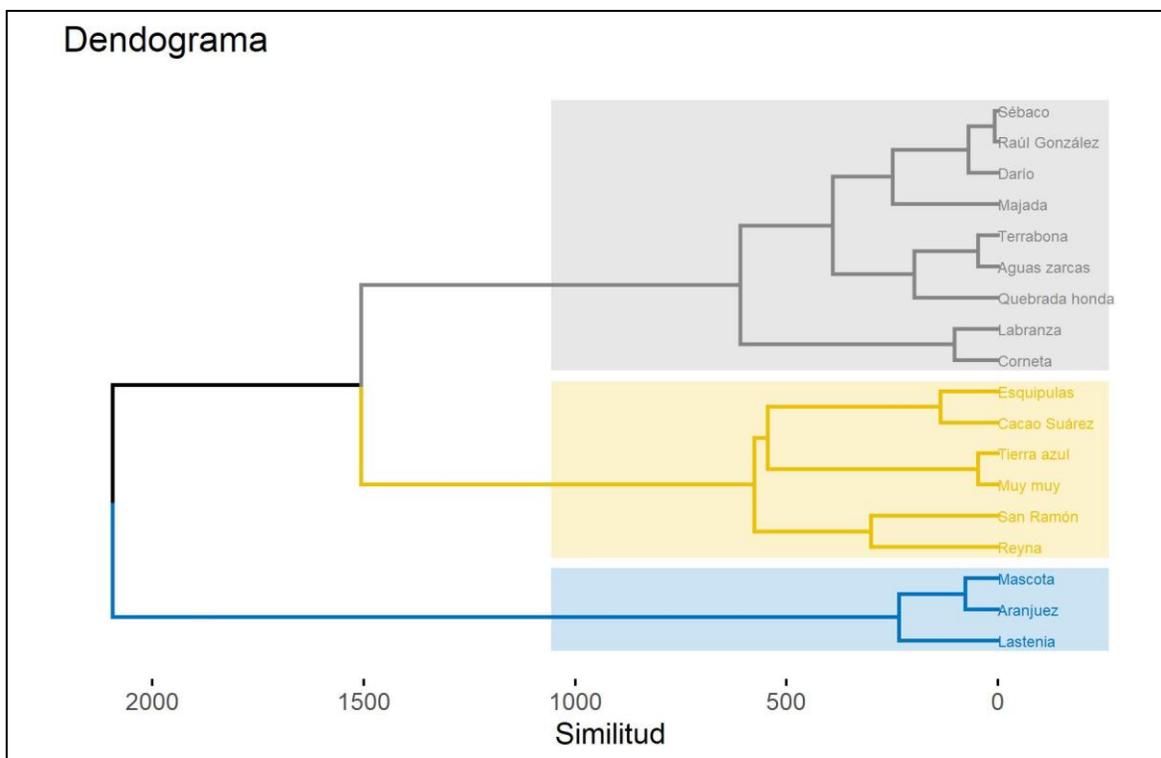


Figura 28. Clúster de las estaciones basado en sus descriptores físicos. Fuente: Elaboración propia con base en INETER (2013).

La región del norte se descartó, por estar conformada por tres estaciones. Dado al conocimiento que se tiene de la zona de estudio, se trasladó la estación “Labranza”, desde la región del Valle hacia la región del Centro, mientras la estación “Santa Lastenia” paso de la región Norte hacia la región del Centro. Se suprimieron las estaciones de Muy muy y Tierra azul. Se constituyeron dos regiones homogéneas con los siguientes atributos:

Cuadro 18. Regiones homogéneas

Clúster	Tamaño	Estaciones	H1	Di
Centro	6	Reyna, San Ramón, Cacao de los Suárez, Esquipulas, Labranza, y Lastenia	0.69	0.16, 1.30, 1.60, 1.43, 0.24 y 1.27 respectivamente
Valle	8	Corneta, Quebrada honda, Aguas zarcas, Terrabona, Majada, Darío, Raúl González, Sébaco	1.62	1.85, 2.01, 0.82, 0.96, 0.34, 0.37, 1.44 y 0.20 respectivamente
Valor crítico			2	1.65 y 2.14 respectivamente

Fuente: Elaboración propia.

Nótese que ninguna región sobrepasa el valor crítico de 2 en el test estadístico H1. Así mismo, ninguna estación sobrepasa el valor crítico de su D_i respectivo, dado por el número de estaciones que contiene cada región. Por lo tanto, se puede proceder a la siguiente etapa.

4.2.3. Elección de distribución de frecuencia

Culminada la etapa de regionalización se procede a elegir la función de distribución que mejor caracterice la región homogénea.

4.2.3.1. Región del Centro

Se simulan la región del centro tomando en cuenta los parámetros de L-Momentos y el número de estaciones que posee la región.

En la figura 29 se reflejan en trazos, las relaciones entre los L-asimetría y L-Kurtosis poblacionales de cada una de las distribuciones, asumiendo los momentos muestrales como representativos de los poblacionales. Los círculos representan cada una de las estaciones, mientras que la cruz (+) hace referencia a la media regional ponderada.

A simple vista, es notorio, que la media ponderada se acerca a las distribuciones Pearson tipo III (PE3) y Normal Generalizada (GNO). No obstante, es necesario corroborar por medio del test de bondad de ajuste (Z_{dist}) para analizar cuáles son las distribuciones que se utilizan en el análisis regional de frecuencias (ARF).

A continuación, se presenta los valores correspondientes al test de bondad de ajuste (Z_{dist}):

Cuadro 19. Valor estadístico Z_{dist} para las diferentes distribuciones de la región del Centro

GLO	GEV	GNO	PE3	GPA
1.35	0.37	0.07	-0.51	-1.97
H1			0.68	

Fuente: Elaboración propia.

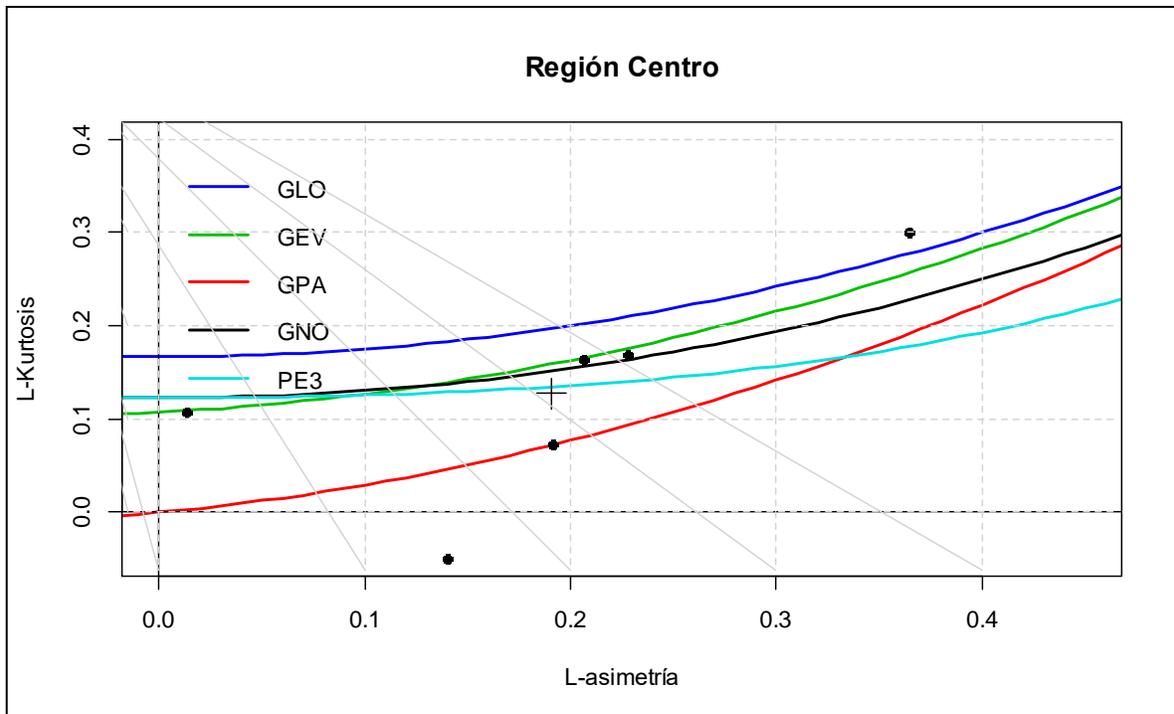


Figura 29. Diagrama de L-Momentos de la región del Centro. Fuente: Elaboración propia con base en INETER (2013).

Bajo el supuesto de que se utilizan en el análisis regional de frecuencias, todas aquellas distribuciones con $|ZDist| < 1.64$, se puede observar que a excepción de la distribución Pareto Generalizada (GPA), todas las distribuciones son válidas. El valor $H1$ clasifica a la región como homogénea ($H1 < 2$).

No obstante, de acuerdo Chen *et al.*, (2006) el ajuste más adecuado se da cuando el $|Zdist|$ es lo suficientemente cercano al cero, un criterio razonable tomando en cuenta que el $|Zdist|$ es menor a 1.64.

Si existe más de una distribución válida, es aceptable, que la distribución con el menor valor $|Zdist|$ sea considerada como la más apropiada. Además, el diagrama de cociente de L-Momentos es usado para identificar la distribución, comparando su cercanía a las combinaciones de L-asimetría y L-Kurtosis.

Bajo esta justificación dentro del conjunto de distribuciones se hace evidente que la distribución Normal Generalizada (GNO) es la más apropiada, por ser su valor de bondad de ajuste ($|ZDist|$), el valor más cercano al cero.

4.2.3.2. Región del Valle

El diagrama de L-Momentos de la región del Valle (ver figura 30) muestra que la media ponderada de L-Momentos, simbolizada por una cruz (+), está próxima a la distribución de Pearson tipo III (PE3). No obstante, distribuciones como la Normal Generalizada (GNO) y Valores Extremos Generalizados parecen también estar próximos a la media ponderada de L-Momentos de la región.

El cuadro 21 presenta los valores de bondad de ajuste ($|ZDist|$) junto al valor de heterogeneidad (H1).

Obsérvese que las distribuciones Pareto Generalizada (GPA), Valores Extremos Generalizados (GEV) y Logística Generalizada (GLO) son descartadas por debido a que $|Zdist|$ es mayor a 1.64. En efecto, las distribuciones Normal Generalizada (GNO) y Pearson tipo III (PE3) son las que cumplen los criterios para el análisis regional de frecuencia.

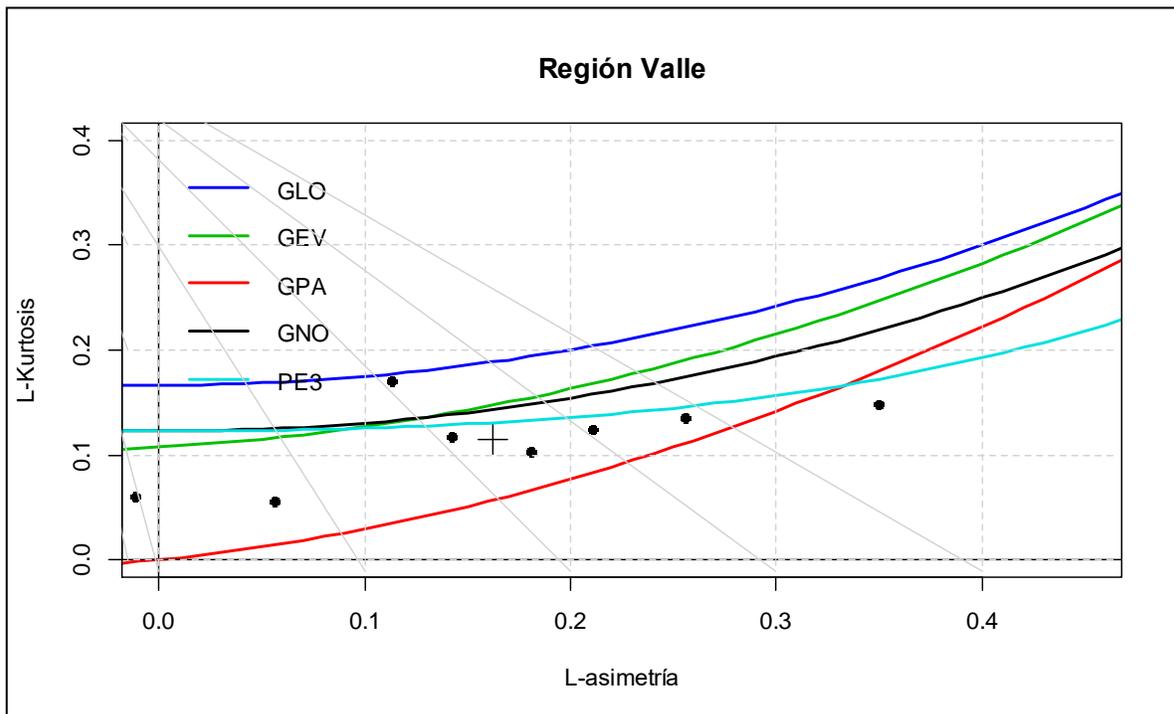


Figura 30. Diagrama de L-Momentos de la región del Valle. Fuente: Elaboración propia con base en INETER (2013).

Cuadro 20. Valor estadístico Zdist para las diferentes distribuciones de la región del Valle

GLO	GEV	GNO	PE3	GPA
3.41	1.64	1.47	0.93	-2.24
H1		1.61		

Fuente: Elaboración propia.

No obstante, se elige la distribución Pearson tipo III (PE3), como la distribución que representa a la región del Valle, por presentar el valor de bondad de ajuste ($|Z_{dist}|$) más cercano a cero.

4.2.4. Estimación de cuantiles de frecuencia

Una vez definida la distribución con mejor ajuste a los L-Momentos de las diferentes regiones, se procede a establecer los parámetros para la estimación de los cuantiles de frecuencias.

4.2.4.1. Región del Centro

La distribución con mejor ajuste a los Momentos Lineales (L-Momentos) de la región del centro, lo constituye la distribución Normal Generalizada (GNO) (En anexo 4 se detalla la ecuación de la función de distribución).

Para el caso de la región del centro, los parámetros adquieren los valores de $x_i=0.9320$, $\alpha=0.2907$ y $k=-0.4449$.

La figura 31 se obtiene a partir de computar los cuantiles regionales adimensionales de precipitación anual para los períodos de retorno T de 2, 5, 10, 20, 50, 100 ($F=0.5, 0.8, 0.9, 0.95, 0.98, 0.99$ respectivamente).

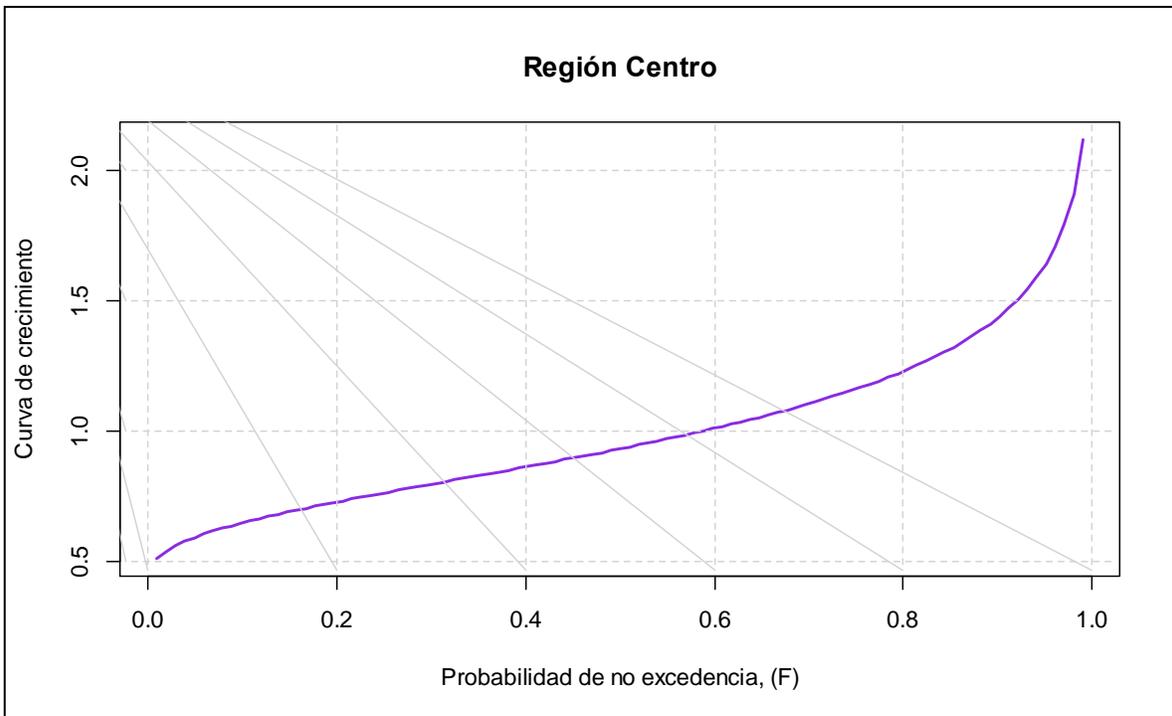


Figura 31. Representación gráfica de las estimaciones regionales, región Centro. Fuente: Elaboración propia con base en INETER (2013).

Los sucesos de sequía de mayor magnitud son eventos que tienen períodos más largos, dado que la curva de crecimiento tiene un comportamiento ascendente, donde a medida que se acerca a la probabilidad de no excedencia de 1, la curva es más pronunciada.

4.2.4.2. Región del Valle

La distribución con mejor ajuste a los L-Momentos de la región del valle lo constituye la distribución Pearson tipo III (PE3). A continuación, se presenta la función de esta distribución:

Para el caso de la región del valle, los parámetros adquieren los valores de $\mu=1$, $\sigma= 0.3802$, $\gamma= 0.9866$. Se computan los cuantiles regionales adimensionales de precipitación anual para los períodos de retorno T de 2, 5, 10, 20, 50, 100 ($F=0.5$, 0.8, 0.9, 0.95, 0.98, 0.99 respectivamente) obteniéndose la figura 32. La curva

revela un comportamiento pronunciado en su pendiente (m), lo que indica que sequías de mayor magnitud se producen con períodos de retornos más largos.

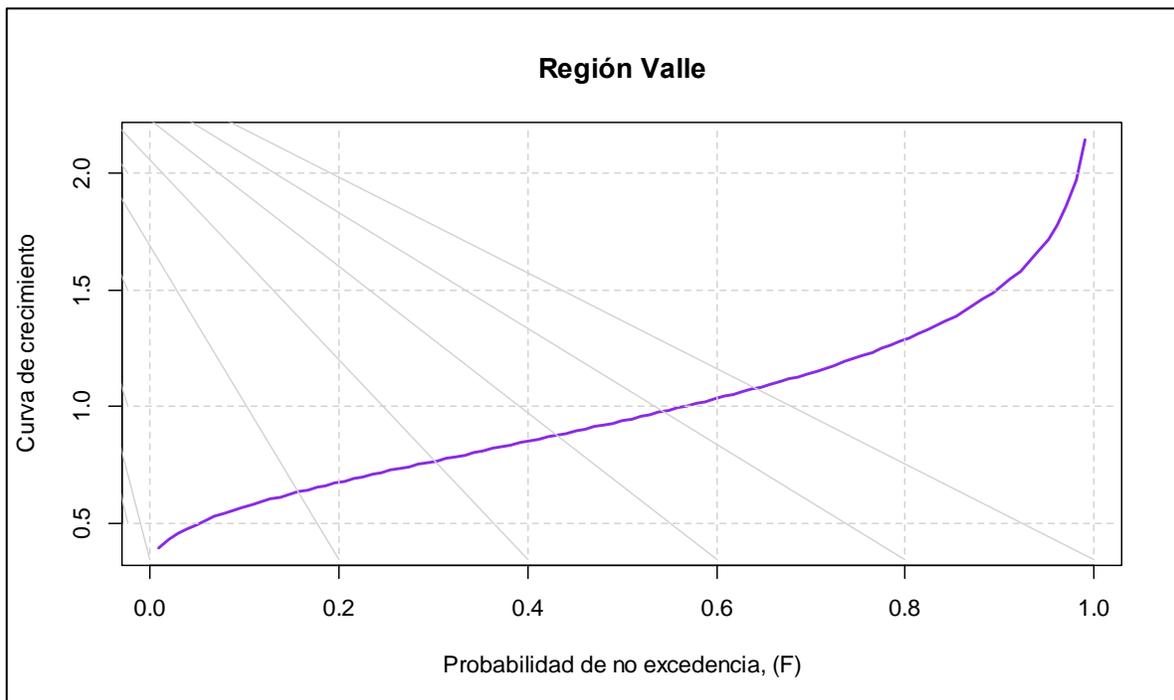


Figura 32. Representación gráfica de las estimaciones regionales, región Valle. Fuente: Elaboración propia con base en INETER (2013).

4.2.5. Mapeo

4.2.5.1. Variable predictiva

En la figura 33, se refleja el comportamiento entre la Precipitación Media Anual (PMA) y el Coeficiente de Variación Lineal (LCV) de la subcuenca. De las 3 funciones analizadas (Exponencial decreciente, logarítmica y cuadrática), únicamente en dos funciones (Exponencial decreciente y cuadrática) se ajustó de manera óptima al conjunto de datos (ver figura 33).

En la figura 33 se puede observar que las funciones estimadas son similares entre sí. Se eligió la función exponencial decreciente debido a que presenta mejor ajuste reflejado en su valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE igual a 0.0462 para la función exponencial decreciente frente a 0.0878 de la función cuadrática)

cercano a cero, y por ser la función más implementada y recurrente en la bibliografía consultada.

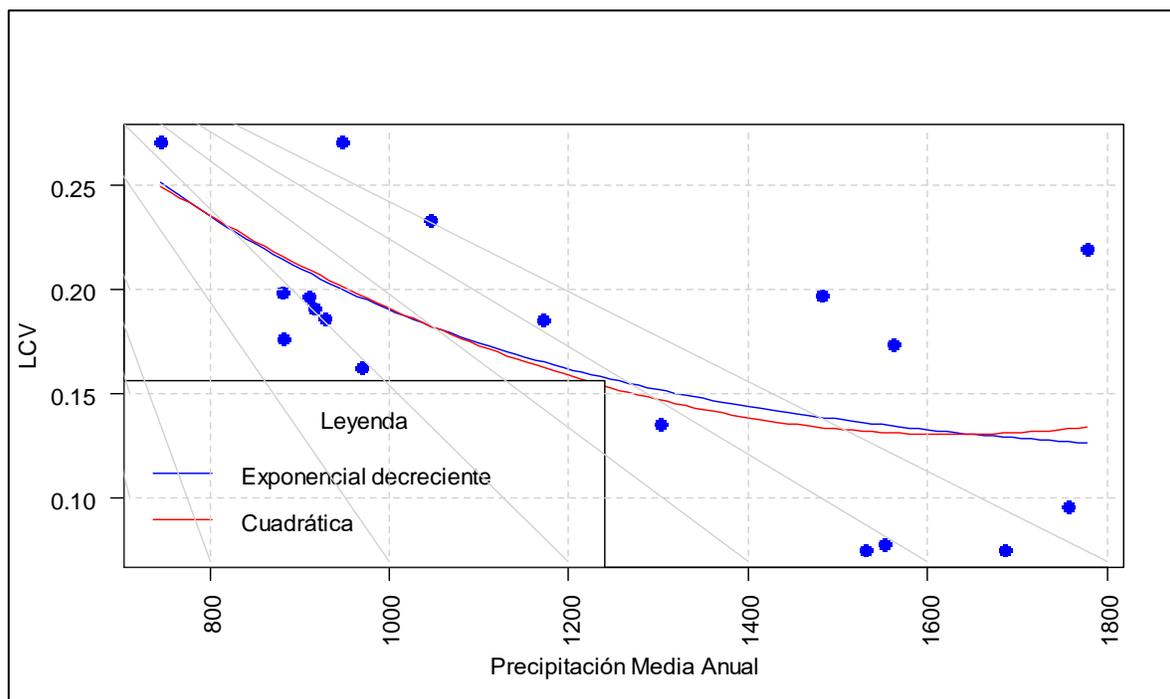


Figura 33. Comportamiento del Coeficiente de Variación Lineal (LCV) frente a la Precipitación Media Anual. Fuente: Elaboración propia.

La función exponencial decreciente, tal y como argumenta Núñez *et al.*, (2010), presenta una relación monótonamente decreciente a medida que la magnitud de la precipitación anual aumenta, tal y como se puede observar en la figura 33. Resultados similares fueron reportados en estudios realizados en Chile por Núñez *et al.*, (2010) y en México por Hallack-Alegria y Watkins (2007).

4.2.5.2. Mapa base

El mapa de la figura 9 muestra el resultado de la interpolación de la Precipitación Media Anual de cada una de las estaciones en estudio a través del método de interpolación tipo Kriging Ordinario (KO). El modelo teórico al cual se ajustó el variograma experimental es de tipo esférico (ver figura 34).

De acuerdo a Giraldo (s.f.), este modelo tiene un crecimiento rápido cerca al

origen, pero los incrementos marginales van decreciendo para distancias grandes, hasta que para distancias superiores al rango los incrementos son nulos.

El modelo teórico presenta una meseta (sill) de 109,634.60 y un rango (range) de 34,464.72, mientras su pepita (nugget) es igual a cero. El Error Medio Absoluto (MAE) es de 0.2211 mm, presentando un coeficiente de determinación del modelo teórico con los datos de 0.5373, Sesgo Medio (MBE por sus siglas en inglés) igual a 0.0385 mm y un valor de 0.3148 mm para la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE por sus siglas en inglés).

Estos valores indican que el ajuste al modelo ha sido óptimo. La importancia de lograr un buen ajuste de interpolación de la Precipitación Media Anual en el presente estudio, no es solo el hecho de representar fidedignamente la distribución del fenómeno en cuestión, sino que el resultado constituye la base para la estimación de los períodos de retorno.

De acuerdo a la figura 35, en el área de estudio, las máximas precipitaciones se localizan en la parte nororiental de la misma, con acumulados medios anuales entre 1,600 mm y 1,800 mm. Por otro lado, los valores mínimos de Precipitación Media Anual (PMA) se localizan en la parte noroccidental de la subcuenca, sobre valles encajonados por donde transita el Río Grande de Matagalpa antes de entrar al valle de Sébaco.

En términos generales, la Precipitación Media Anual en la subcuenca disminuye de este a oeste, influenciada por la topografía predominante y al efecto orogénico. Así, las altas montañas fuerzan al aire húmedo a ascender, produciendo mayores cantidades de precipitación en el lado del ascenso (barlovento), al pasar las montañas (sotavento) e iniciar el descenso, el aire se calienta y no solo produce menos precipitación, sino que aumenta la temperatura, generando un aire más seco durante el proceso.

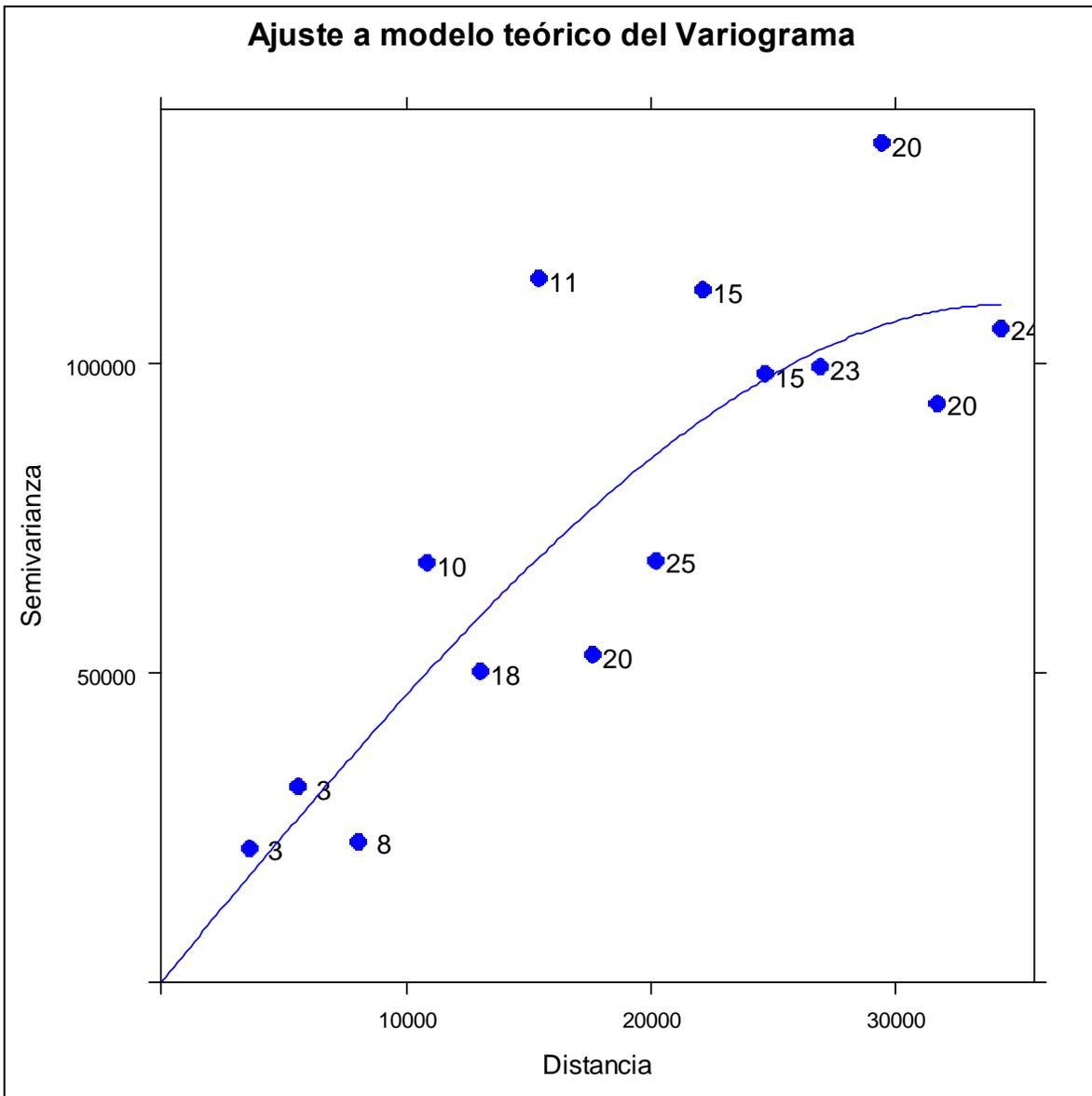


Figura 34. Semivariograma omnidireccional con ajuste al modelo teórico esférico.

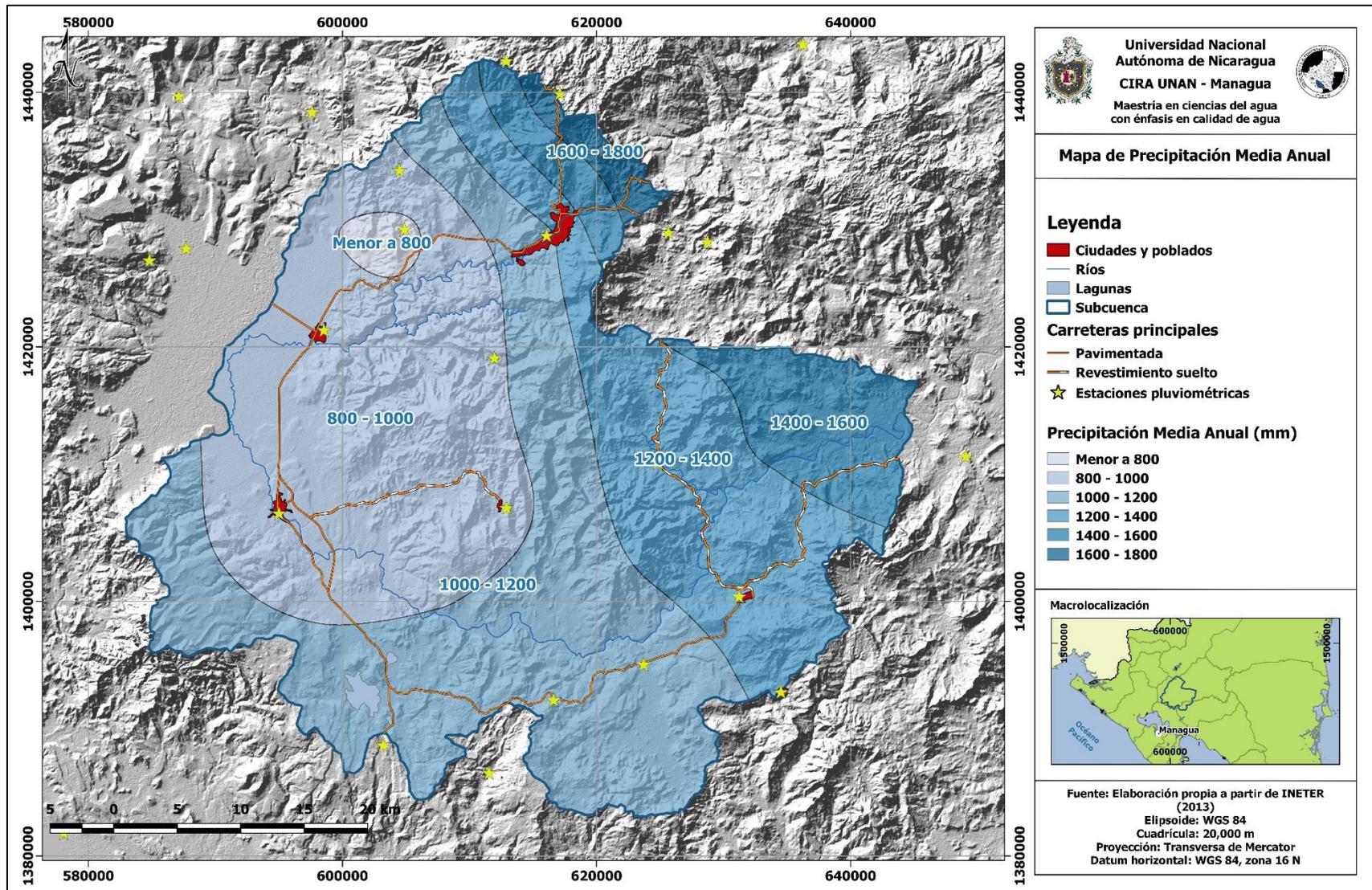


Figura 35. Mapa de Precipitación Media Anual del área de estudio estimado a través del método de Kriging Ordinario.

4.2.5.3. Período de retorno cuando las precipitaciones se reducen en un quince por ciento

La figura 36, muestra la distribución espacial de los períodos de retorno de sequía, correspondiente a un déficit de precipitación del orden del quince por ciento, con respecto a la media. Nótese que sequías de tal envergadura son muy recurrentes en la subcuenca, siendo la frecuencia menor de tres años.

Es importante mencionar que en el área circundante al poblado Quebrada honda (coordenadas 605505E y 1427978N), en la parte noroeste (NO) de la subcuenca, la amenaza de sequía por el orden del 15 % es más recurrente que en el resto de la subcuenca, debido a que dicha área se localiza en sotavento en relación a las elevaciones más importantes (elevaciones por encima de los 1,200 msnm).

Según Vargas (2004), las cordilleras de la zona central de Nicaragua funcionan como una barrera que bloquea el paso de la humedad que aportan los vientos alisios del noreste (NE), cayendo en barlovento en el lado del Caribe y en Sotavento hacia el oeste del mismo.

Entre los poblados afectados por la sequía con períodos de retorno de dos años por disminución del 15 % de la precipitación media se encuentra: Quebrada honda, Quebrada seca, Los Cordones, Cuatro Esquinas y las Palomas.

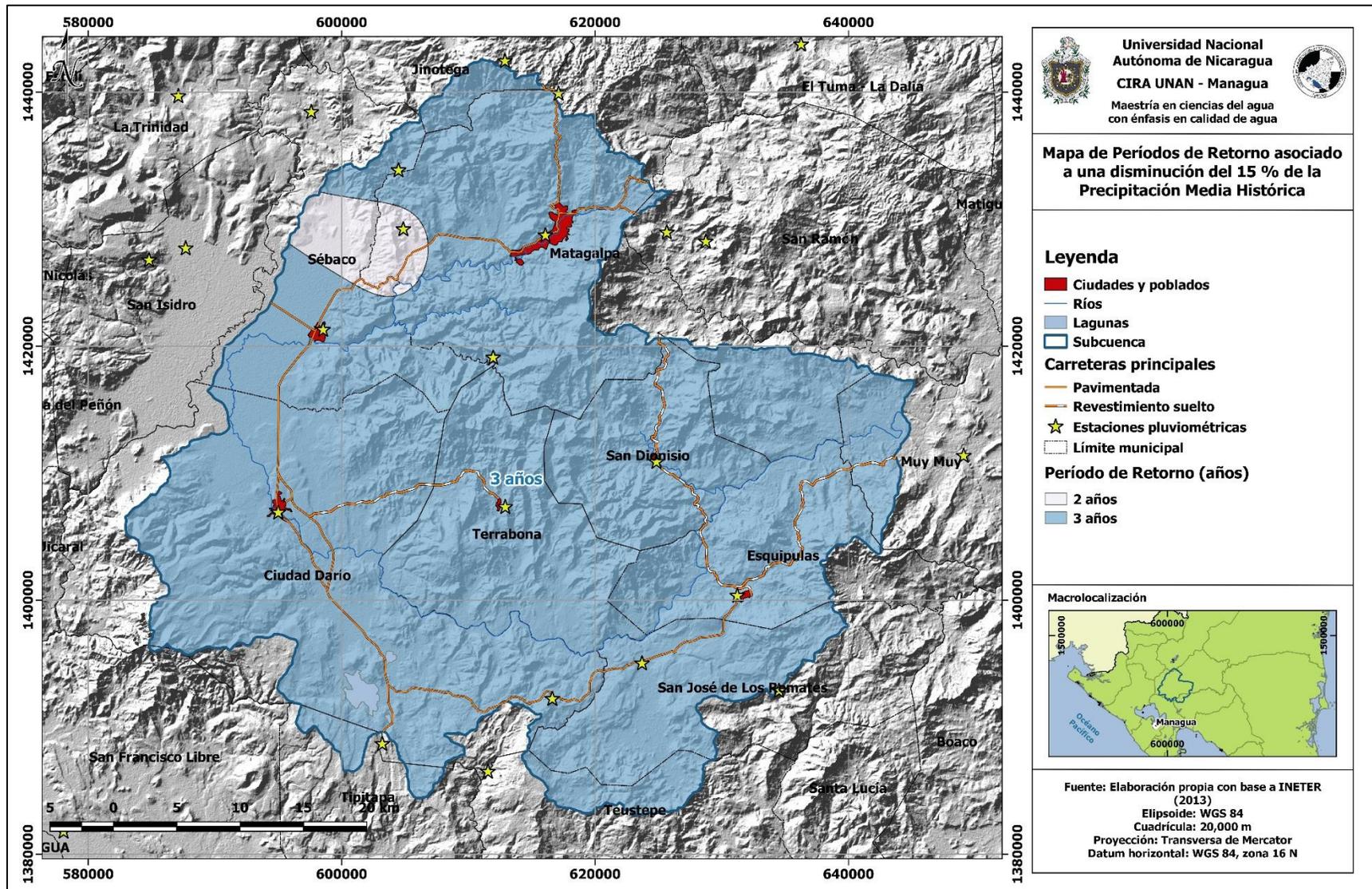


Figura 36. Mapa de período de retorno asociado a una disminución del 15 % de la Precipitación Media Anual Histórica.

4.2.5.4. Período de retorno cuando las precipitaciones se reducen en un treinta por ciento

El comportamiento es similar al anterior cuantil, en cuanto a la influencia que ejerce la longitud y la altitud en la aparición del fenómeno. No obstante, los períodos de retorno de sequía son más espaciados cuando se compara la reducción de la precipitación por orden del treinta por ciento (30 %) con las sequías por orden del quince por ciento (15 %).

Su recurrencia está ligada a factores geográficos (longitud) y físicos (altitud), fuertemente enlazados. Así, por ejemplo, los períodos de retorno son proporcionales a la longitud, es decir, a medida que aumenta la longitud, la recurrencia de eventos de sequía de tal magnitud (30 % de reducción de la precipitación respecto a la media) tienen periodos de retorno más amplios.

Según Vargas (2004), la región denominada núcleo seco de Estelí a Sébaco es una meseta en abrigo, donde el flujo del alisio del noreste (NE) es bloqueado por las cordilleras Dariense e Isabela, y el alisio del suroeste (SO) lo bloquea la cordillera Central.

Este flujo se ve debilitado durante la aparición de sequías con mayores intensidades en el área de estudio y en general en Nicaragua, particularmente en sitios donde las condiciones de relieve acentúan el fenómeno.

Existe zonas dentro de la subcuenca que poseen períodos de retorno cortos menores a 5 años, tal es el caso de la parte oeste de la subcuenca. Esta última constituye la zona más seca y comprende el 51.56 % del área total de la misma. Los municipios afectados con períodos de retorno menores a 5 años se encuentran: Sébaco, Darío, Terrabona y parte del municipio de Matagalpa

Obsérvese que, en la parte norte de la Subcuenca, los períodos de retorno de sequía oscilan entre 5 y 10 años. La cadena montañosa funciona como divisoria entre las zonas, encontrándose los mayores períodos de retorno hacia la zona noreste (NE) de la subcuenca.

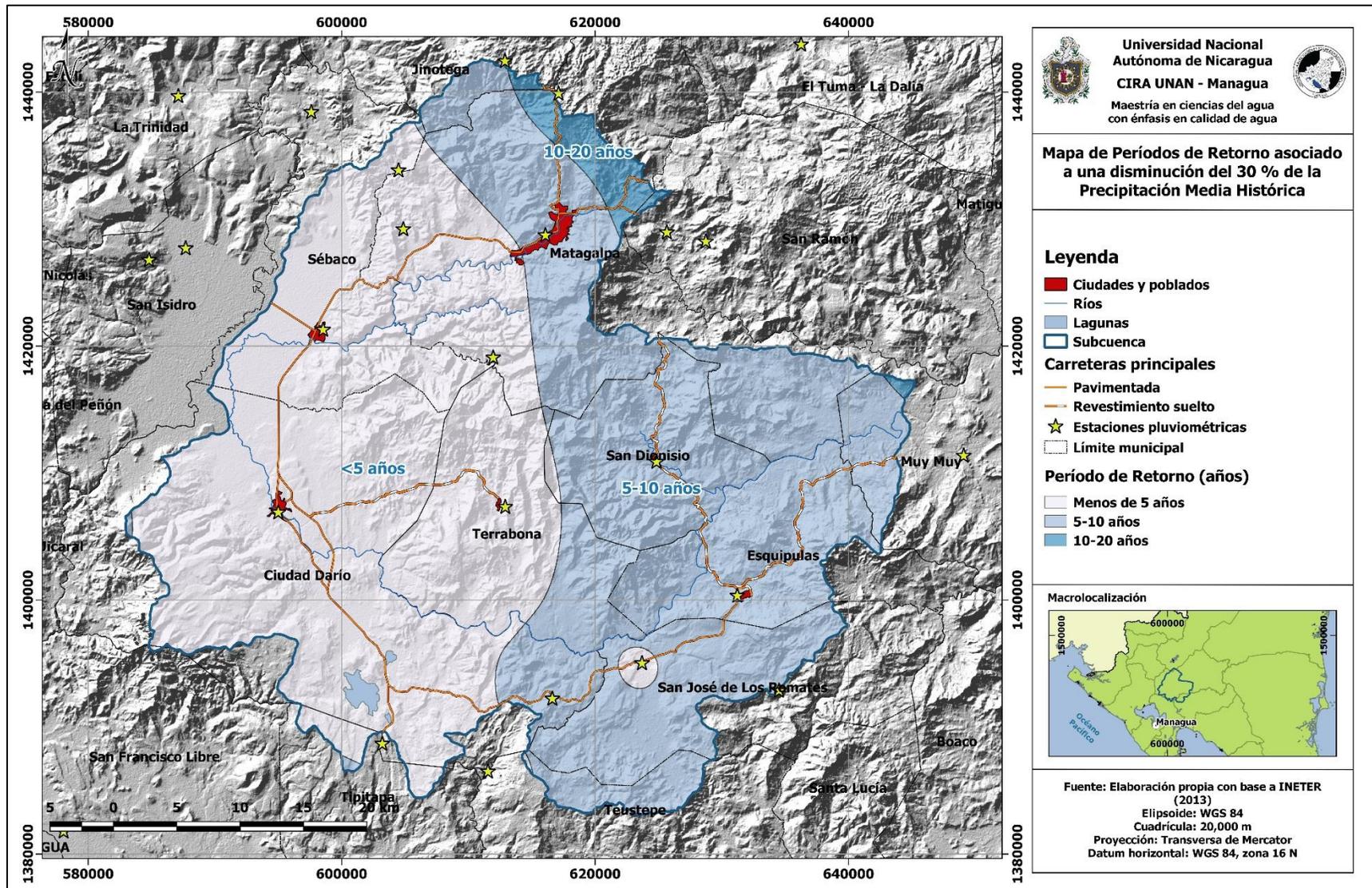


Figura 37. Mapa de período de retorno asociado a una disminución del 30 % de la Precipitación Media Anual Histórica.

Períodos de retorno de sequía de 10 a 20 años se presentan en la subcuenca en la parte noreste, sobre todo en las partes más altas, comprendiendo un área no mayor al 2.2 % del área total.

El Valle de Sébaco y el área circundante al poblado Quebrada honda constituyen una zona muy peculiar, por qué además de registrar las menores precipitaciones presenta los períodos de retorno más corto.

4.2.5.5. Período de retorno cuando las precipitaciones se reducen en un cuarenta y cinco por ciento.

Disminuciones en las precipitaciones por el orden del cuarenta y cinco por ciento respecto a la media histórica, son menos recurrente en la subcuenca, particularmente hacia el noreste de la misma. Ayuso, (2012) indica que las grandes avenidas (en este caso sequía de grandes magnitudes) tienen grandes periodos de retorno y viceversa.

Así, se observa en ciertos puntos, períodos de retorno de sequía igual a 69.35 años. En efecto, esto está en concordancia con el análisis de los datos registrados, donde en algunos puntos no ocurrió sequía de tal magnitud.

Por otro lado, gran parte de la subcuenca posee períodos de retorno entre 10 y 20 años (48.17 % del área total), para una disminución de las precipitaciones del cuarenta y cinco por ciento.

Es importante destacar, que ciertas áreas, poseen mayor recurrencia de sequías de tal envergadura de menos de una década (entre 5 y 10 años), como ocurre adyacente a la estación de Quebrada honda, en los poblados de Quebrada honda, Quebrada seca, El Cacao y Cuatro Esquinas.

La parte norte y este de la subcuenca presentan períodos de retorno de sequía entre 20 y 50 años, y mayor de 50 años respectivamente. La primera, ocupa un área correspondiente al 26.99 % del área total; y la segunda, ocupa un área equivalente al 23 % del área total de la subcuenca.

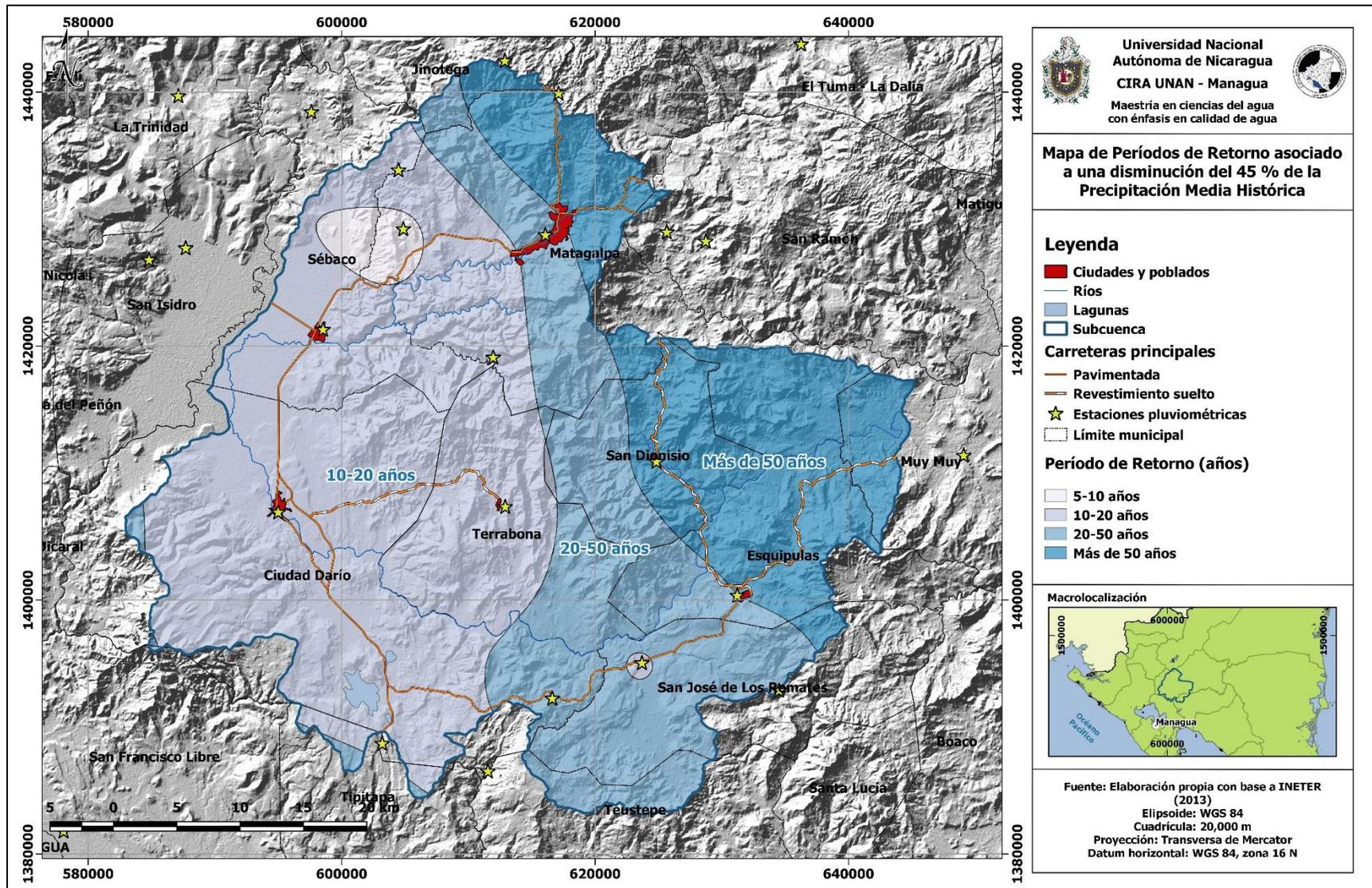


Figura 38. Mapa de período de retorno asociado a una disminución del 45 % de la Precipitación Media Anual Histórica.

4.3. ESTRATEGIAS PRODUCTIVAS FRENTE A LA SEQUÍA

4.3.1. Cultivos

Dado que el fenómeno es de origen natural, la adaptación a los efectos debe enfocarse a buscar estrategias capaces de responder directamente a la amenaza, y no a la evasión. En muchos países, incluyendo Nicaragua, ha sido objeto de estudio en la agenda de investigación de diferentes actores sociales, en pro de encontrar soluciones factibles.

El sector agropecuario funciona como uno de los sectores con mayor riesgo, sin omitir que los efectos de la sequía adquieren el denominado “efecto dominó” en todos los ámbitos de una sociedad.

A continuación, se presenta una compilación de variedades de los cultivos analizados que pueden utilizarse al presentarse un evento de sequía.

4.3.1.1. Maíz

Nutrader y Mazorca de Oro, son variedades de alta calidad proteínica, ambos creados por el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Entre las cualidades que mencionan de estas variedades están: rinden entre 55 y 91 quintales por manzana; la semilla se puede usar en tres ciclos de siembra; se adaptan a los sistemas de producción del pequeño agricultor; la mazorca es de excelente calidad y tamaño; los tallos son resistentes; tienen muchas proteínas porque son nutritivas; su grano es resistente al ataque de gorgojos; no necesitan de mucho fertilizante y lo más importante relativo a este estudio, son resistentes la sequía.

Estas variedades se adaptan bien desde zonas bajas hasta zonas muy altas, en diferentes tipos de suelo, y en laderas (Bendaña, 2012).

INTA (2010) indica que la variedad NB-S es tolerante a la sequía y posee un rendimiento comercial de 40 a 50 qq/mz, pudiendo cultivarse en cualquiera de los

3 ciclos de siembra. Se recomienda para zonas secas en los departamentos de Jinotega, Matagalpa, Nueva Segovia, Estelí, Madriz, Masaya, León y Chinandega.

No se descarta que variedades autóctonas hayan desarrollado las características necesarias para contrarrestar los efectos de la sequía, precisamente por estar mantenidas desde hace siglos por campesinos que las han seleccionado para que produzcan bien en ciertas condiciones ambientales y respondan a los gustos culinarios de su localidad.

En consecuencia, estas variedades suelen poseer características únicas que son portadas y transmitidas en sus genes. De acuerdo con el Programa Campesino a Campesino (PCaC) citado por Bendaña (2012), las variedades criollas que registra Matagalpa son: Olotillo blanco, pinolero, amarillo criollo, masaya, pionero, pujagua morado y rojo y salco.

Teóricamente, cualquiera de estas variedades de maíz puede ser utilizada durante la aparición de un evento de sequía. No obstante, Escoto *et al.*, (2008), en un estudio que utilizaba el tratamiento estadístico, llevado a cabo en once (11) comunidades del departamento de Matagalpa y Jinotega, indicó que de las tres variedades evaluadas (mazorca de oro, nutrader y vitaminado), la variedad que resultó con mayor tolerancia a sequía fue la variedad “nutrader”.

Por tanto, este estudio recomienda, no sin reservas, que esta es la variedad que debe implementarse en la zona de estudio. Sin embargo, se recomienda que se debe realizar más pruebas de campo para aumentar la confiabilidad productiva.

4.3.1.2. Frijol

Al igual que el maíz, el cultivo de frijol ha sido una de las especies de interés, por su importancia en la alimentación de los nicaragüenses y la poca tecnificación en cultivo y cosecha. Así surge INTA SSAN Sequía. Según INTA (2009) esta variedad resulta de la cruce de líneas tolerantes a sequía y alta temperatura; y ha pasado por procesos de investigación y validación con agricultores, en zonas de escasas lluvias y suelos con baja fertilidad.

En pruebas de campo efectuadas con productores ubicados en las zonas secas del país INTA SSAN Sequía, superó en un 30% en rendimiento de grano a la variedad utilizada por ellos. Entre las ventajas de esta variedad están: tolerancia a sequía y altas temperaturas, resistencia a virus y enfermedades como el mosaico dorado, mosaico común, roya, antracosis y mancha angular, tiene porte erecto para evitar que las vainas entren en contacto con el suelo.

Madura entre los 60-65 días y tiene buen comportamiento con precipitaciones bien distribuidas, con acumulados entre 150-200 mm de agua durante el ciclo.

Muchas variedades criollas por sus características intrínsecas y debido a su instaurada adaptabilidad al medio, durante varias décadas, han presentado un comportamiento positivo ante la sequía. Bendaña (2012), concluye que el frijol “chile seda vaina rolliza”, “chile vaina roja N° 1”, “chile vaina roja N°2”, “seda N° 1”, todos pertenecientes al Grupo N° 1 de la filotaxia realizada en Las Segovias, son tolerantes a la sequía.

Otras variedades, que, a pesar de sus bondades y ventajas, todavía no han sido objeto de estudios a detalle de validación sobre el comportamiento ante la sequía, pero que de manera empírica se han obtenido resultados positivos son: Guaniseño, banquero, orgulloso, ponete lolla, venado, plomo, etc.

Se advierte que los rendimientos de las variedades criollas tienden a ser menores en relación a las variedades mejoradas. No obstante, el uso de prácticas de manejo tales como la fertilización y el control de plagas y enfermedades maximiza los resultados de los rendimientos de estos.

4.3.1.3. Café

Bajo las condiciones climáticas en la que se desarrolla el café en Nicaragua, es quizás de los tres cultivos analizados en el presente estudio, en el que la sequía y sus efectos repercuten poco. No obstante, la preocupación persiste ante los efectos directos (hídricos) sobre el cultivo y sus daños colaterales, tales como la proliferación de plagas.

Se precisa que la variedad que se recomendará está lejos de ser el resultado de una investigación en contra de los efectos de la sequía, sino que ha sido más bien, el resultado de investigaciones en contra de la roya, pero que por sus características intrínsecas y el vigor genético que posee, se hace oportuno su uso.

Baca (2012), indica que la variedad marsellesa es un F1 que surge del cruce del sarchimor y el caturra, es resistente a la sequía, tolerable o resistente a la roya, antracnosis y otras enfermedades voraces del café y tiene un alto rendimiento y calidad.

4.3.2. Suelos

4.3.2.1. Obras de conservación de agua y suelo

Se hace necesario recomendar para coadyuvar de manera artificial los procesos de retención de agua en el suelo, a través de prácticas culturales y no culturales en el cultivo, a fin de mitigar los efectos de la sequía sobre los cultivos.

Entre las prácticas culturales se citan aquellas utilizadas en el programa de Conservación de Agua y Suelo (CAS) destinadas a prevenir la erosión, (particularmente de texturas francas y limosas) y aumentar la retención de humedad en el suelo como:

- ✓ Trazado de curvas de nivel.
- ✓ Elaboración de terrazas y acequias.
- ✓ Implementación de Barreras vivas y muertas.
- ✓ Uso de mulch en el suelo.
- ✓ Uso de abonos orgánicos ricos en materia orgánica.

Por otro lado, diversas alternativas han surgido, a fin de mitigar los efectos de la sequía, realizándose investigaciones en compuestos capaces de almacenar agua durante un período dado, liberándose posteriormente de manera paulatina, tal es el caso del hidrogel.

Estrada *et al.*, (2010) define hidrogel como un compuesto formado por polímeros que tienen la capacidad de absorber y ceder grandes cantidades de agua y otras soluciones acuosas sin disolverse. Dicho proceso ocurre a distintas velocidades de acuerdo al grado de polimerización del material.

Estudios como el de Idrobo *et al.*, (2010), apunta en sus conclusiones que la mayor cantidad de hidrogel en un suelo, incrementa la eficiencia en la retención del agua de un suelo arenoso, mostrando diferencia significativa entre los diferentes tratamientos a base de hidrogel respecto a los testigos (suelos sin hidrogel), por lo que indican los autores que es – o debería de ser – un complemento esencial para los suelos con niveles de drenaje naturales altos y pobres en nutrientes.

Sin embargo, González *et al.*, (s.f.) advierte que el hidrogel no debe ser utilizado como medio sustentante y nutritivo para cultivos tales como la espinaca.

El mecanismo de absorción de agua por parte del hidrogel está dado, según Estrada *et al.*, (2010), tanto por difusión, como por penetración del agua a través de las cavidades porosas, presentándose la liberación del agua como un comportamiento lineal para las diferentes concentraciones de gnetina y para el APA (Ácido poliacrílico) con peso molecular de 15.000 y 30.000 g/mol.

El hidrogel parece una alternativa plausible, sin embargo, sus costos parecen no corresponder con la realidad económica que posee los productores de maíz y frijoles en Nicaragua. Ante esta situación el estado debe ser facilitador del proceso, por medio de mecanismos económicos similares al que utiliza el café en sus exportaciones.

Se recomienda la implementación y difusión de esta tecnología, en las comunidades aledañas a Quebrada onda, por ser el área que presenta con mayor frecuencia eventos de este tipo, además de ser el área dentro de la subcuenca donde se presenta los menores valores acumulados de precipitación anual.

4.3.2.2. Uso potencial del suelo

Ciertas áreas, de acuerdo a sus características naturales, permiten por sí solas sostener la actividad económica que en ellas se desarrolla. El uso potencial del suelo permite coadyuvar a que los efectos de la sequía ejerzan menor presión sobre el sistema.

Según la figura 39, más de la mitad del área de la subcuenca tiene por potencial del suelo alguna modalidad del tipo forestal (54.48 % que corresponde a 1,168.97 km²), seguido del tipo pecuario (28.54 % que corresponde a 612.38 km²) y, por último, el tipo agrícola (364.68 km², es decir el 16.98 %).

Las zonas noreste con potencial agrícola deben estar dirigidas a cultivos que permitan la conservación de la humedad, multiestrato, tales como el café o el cacao y en correspondencia con los requerimientos edafológicos del cultivo, usando prácticas agrícolas adecuadas (curvas a nivel). No se descarta cultivos como las hortalizas en lugares donde la pendiente permita un adecuado desarrollo (pendiente llana).

Entre tanto, las zonas con vocación agrícola, en la parte suroeste deben ser cultivadas con especies de requerimientos hídricos bajos, tales como el sorgo. Las especies forestales deben adecuarse a las condiciones edafoclimáticas de la zona.

Por otro lado, los suelos con potencial pecuario deben basar sus explotaciones en razas del cebú, las cuales por sus características intrínsecas se adaptan a condiciones más extremas (como lo es la sequía) que sus contrapartes europeas. En todo caso, cambiar el hato de una región suele ser difícil, por lo que los cruces europeos con razas del cebú parecen más recomendables.

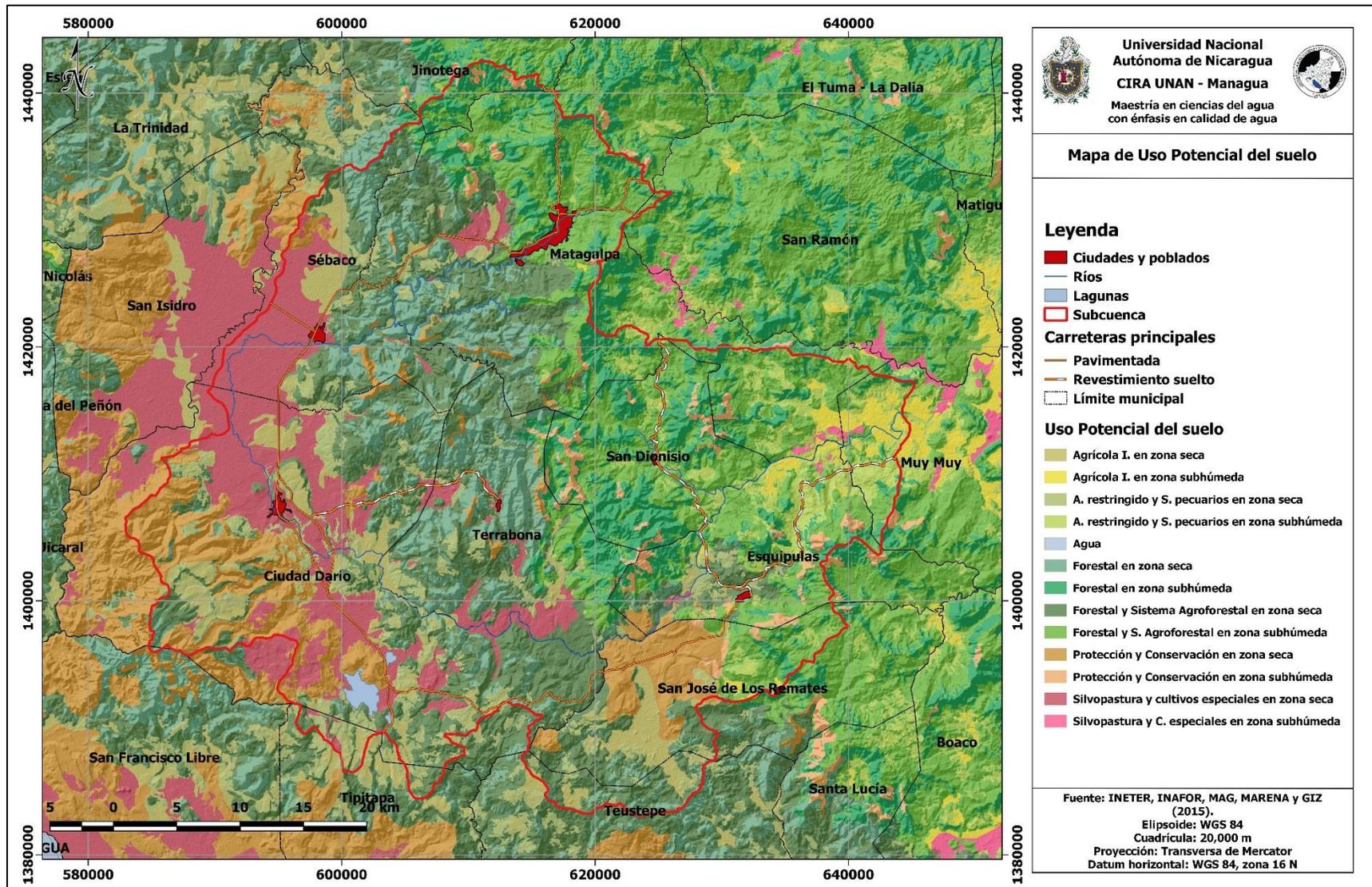


Figura 39. Mapa de uso potencial del suelo del área de estudio.

4.3.2.1 Sistemas agroforestales y otras prácticas agro ecológicas

Los sistemas agro-forestales, son una forma de uso de la tierra en donde especies leñosas perennes interactúan biológicamente en un área con cultivos y/o animales. El propósito fundamental es diversificar y optimizar la producción respetando en principio de la sostenibilidad (López, 2007).

Los sistemas agroforestales se proponen para la mayor parte del área de la subcuenca, particularmente en regiones donde la pendiente se encuentra por encima del 30 %.

Las técnicas agro-forestales son utilizadas en regiones de diversas condiciones ecológicas, económicas y sociales. En regiones con suelos fértiles, los sistemas agro forestales pueden ser muy productivos y sostenibles; igualmente, estas prácticas tienen un alto potencial para mantener y mejorar la productividad en áreas que presenten problemas de baja fertilidad y exceso o escasez de humedad de los suelos (Musálem, 2001).

4.3.3. Necesidades de riego

4.3.3.1. Dotación de los cultivos

Maíz

Las condiciones climáticas restringen las necesidades hídricas del cultivo. Por tanto, es evidente que en zonas donde las tasas de evapotranspiración alcanzan valores máximos dentro de una cuenca hidrográfica, las necesidades hídricas de los cultivos incrementan.

La figura 40 remarca la existencia de diferencias en las necesidades hídricas del cultivo del maíz en una misma zona y en una misma temporada de siembra, respecto a otras temporadas de siembra. Estas diferencias son explicadas por la fisiología del cultivo del maíz, en conformidad con las etapas fenológicas.

De acuerdo con Allen *et al.*, (2006) poco después de la plantación de cultivos

anuales el valor de Kc es pequeño, con frecuencia menor a 0,4. El valor de Kc comienza a aumentar, a partir de este valor inicial de Kc, al comenzar el desarrollo rápido de la planta y alcanza su valor máximo, Kc med, al momento del desarrollo máximo, o cercano al máximo, de la planta.

Durante la etapa de final de temporada, a medida que las hojas comienzan a envejecer y se produce la senescencia debido a procesos naturales o las prácticas culturales, el valor de Kc comienza a disminuir hasta alcanzar un valor mínimo al final de la temporada de crecimiento igual a Kc fin.

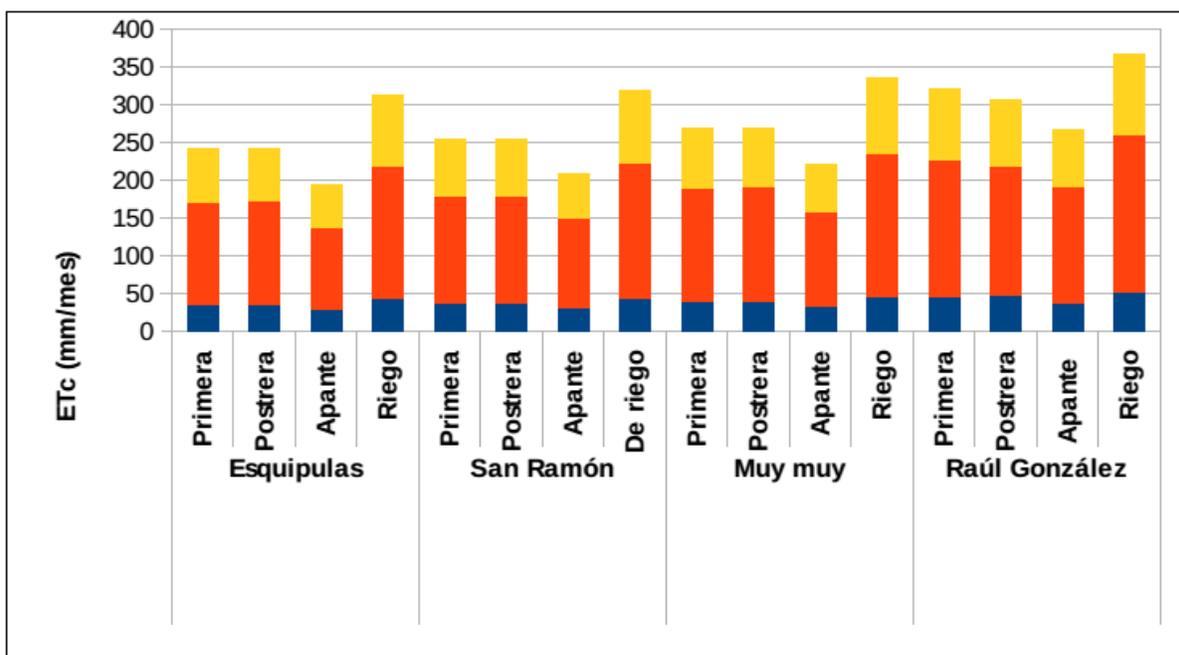


Figura 40. Necesidades hídricas del cultivo de maíz en la subcuenca parte alta del Río Grande de Matagalpa. Fuente: Elaboración propia con base en INETER (2013).

El color azul corresponde a las necesidades de agua en la primera etapa del cultivo de maíz o etapa inicial, que va desde 0 a 20 días después de la siembra; el anaranjado a la segunda etapa que comprende un período entre 30 y 50 días (depende de la variedad) posterior a la etapa inicial y el amarillo, a la última etapa que dura un poco más de 10 días.

Las necesidades hídricas durante la época de siembra de Apante, son menores en relación con las demás temporadas. Esto es explicado por las bajas temperaturas que se presentan en estas fechas, lo cual provoca que un volumen menor de agua

se evapore.

La figura 40 así mismo, revela que las zonas que presentan menos precipitaciones, son las zonas donde los cultivos demandan mayor cantidad de agua, debido a que la evapotranspiración en dichos lugares es mayor.

Esta relación inversa exagera los efectos de la sequía sobre los cultivos en estos lugares. Por tanto, es necesario, identificar fuentes de agua capaz de suplir tales necesidades, a fin de no comprometer la producción de este grano tan elemental en la alimentación de los nicaragüenses.

Frijol

El frijol, al igual que el maíz, constituye un cultivo anual de corta duración, por lo que sufre cambios en sus necesidades hídricas, a medida que transcurren las diferentes etapas fenológicas.

De acuerdo con Allen *et al.*, (2006) después de un evento de lluvia o riego, el efecto de evaporación es predominante cuando el cultivo es pequeño y sombrea escasamente el suelo. A medida que el cultivo se desarrolla, tanto el área del suelo cubierta por la vegetación como la altura del cultivo y el área foliar variarán progresivamente.

Debido a las diferencias en evapotranspiración que se presentan durante las distintas etapas de desarrollo del cultivo, el valor de K_c correspondiente a un cultivo determinado, también variará a lo largo del período de crecimiento del mismo.

Obsérvese en la figura 41 que el núcleo anaranjado conforma las máximas necesidades hídricas que posee el cultivo de frijol, en congruencia con la etapa intermedia (período entre 30 y 50 días), donde se lleva a cabo la prefloración, floración, formación y llenado de las vainas.

En general, el cultivo necesita alrededor de 180 y 340 mm de agua para llegar a cabo sus diferentes procesos fisiológicos en la subcuenca. INTA (2009) por su parte, indica que las necesidades de agua durante el ciclo del cultivo de 60-120

días, varían entre 300-500 mm de agua según el clima para Nicaragua.

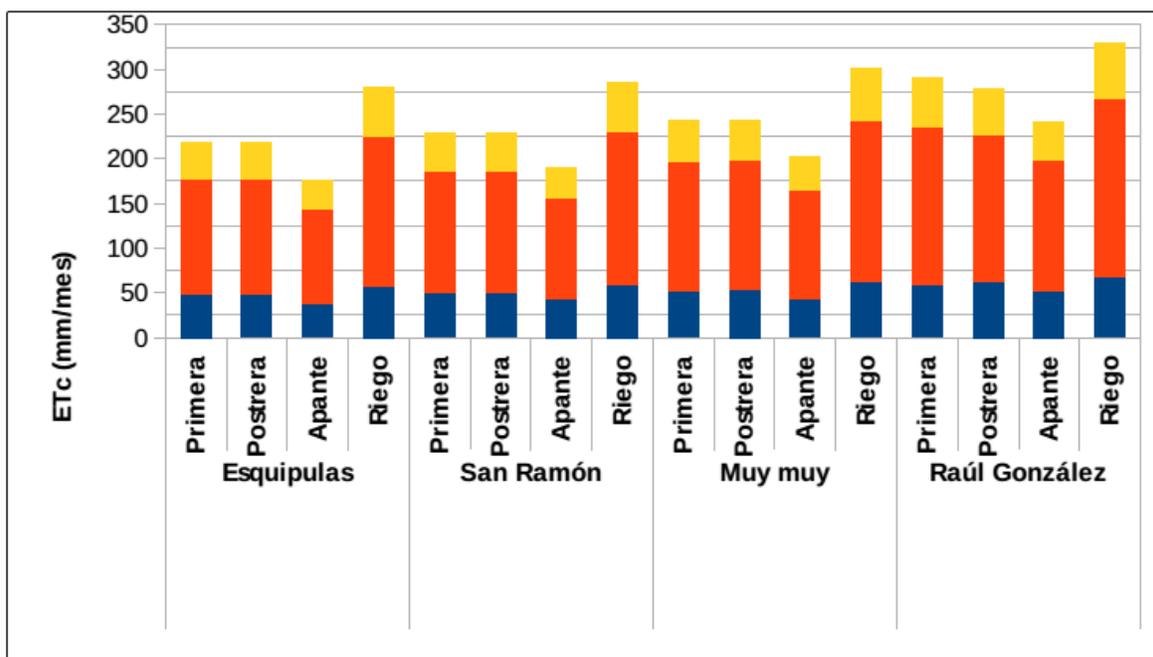


Figura 41. Necesidades hídricas del cultivo del frijol en la subcuenca parte alta del Río Grande de Matagalpa. Fuente: Elaboración propia con base en INETER (2013).

De igual manera, el clima influye sobre las necesidades hídricas del cultivo. Lugares con temperaturas promedio más altas, genera una mayor tasa de evapotranspiración que necesita ser suplida ya sea por la lluvia o por riego. El cultivo de frijol del valle de Sébaco requiere mayor cantidad de agua que las demás regiones. Asimismo, dentro de la estación lluviosa, la siembra de primera requiere mayor cantidad de agua.

Café

Las necesidades hídricas del cultivo de café están en función no solo del tiempo, sino también de la etapa fenológica en la que se encuentra, así como la localidad. Ante esto, es comprensible que cafetos en crecimiento requieran menos cantidad de agua para poder llevar a cabo sus actividades fisiológicas, sin importar la localización y el tiempo.

No obstante, está claro, que, sin importar el régimen de precipitaciones, la

evapotranspiración juega un papel crucial en la distinción de las necesidades hídricas en los diferentes cultivos. En las condiciones de Nicaragua, la figura 42 parece atender contra lo habitual en una unidad de producción, donde los máximos aportes de agua al cultivo se registran entre los meses de septiembre y octubre, dado que no hay tradición de riego para este cultivo perenne.

Se fija la necesidad hídrica anual para el cultivo de café en etapa de crecimiento entre 1,486 y 1,558 mm anuales (Esquipulas y San Ramón respectivamente), mientras en etapa de producción oscila entre 1,557 y 1,632 mm anuales. ICAFE (2011) apunta, que, con menos de 1,000 mm anuales, se limita el crecimiento de la planta y por lo tanto la cosecha del año siguiente.

Además, un período de sequía muy prolongado propicia la defoliación y en última instancia la muerte de la planta.

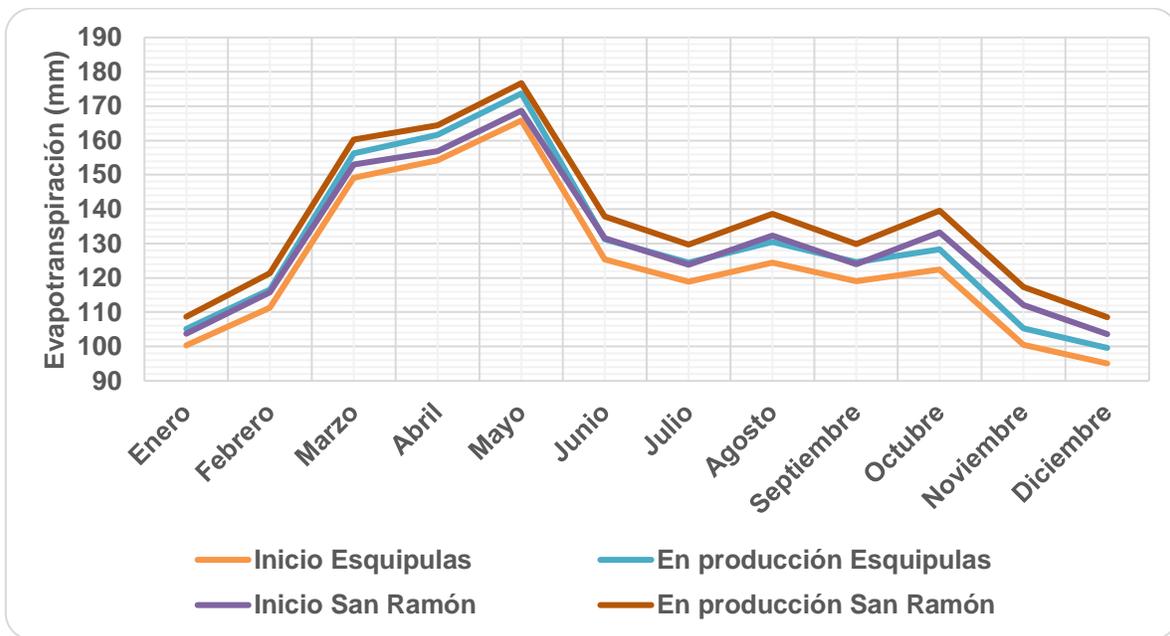


Figura 42. Necesidades hídricas del cultivo del café en la subcuenca parte alta del Río Grande de Matagalpa. Fuente: Elaboración propia con base en INETER (2013).

4.3.3.2. Nivel de agua subterránea e identificación de manantiales

Agua subterránea

Se hace referencia al comportamiento del flujo del agua subterránea del valle de Sébaco en un momento determinado, por lo que la dinámica puede cambiar en función del tiempo.

El enfoque de análisis se basa en el acuífero como fuente alternativa de agua frente a la amenaza de sequía, su posible uso y restricción, tomando en cuenta la preservación del recurso.

La zona de recarga se localiza en la parte noreste del valle, así como hacia el oeste del mismo. La zona de descarga se localiza en la parte suroeste del acuífero, específicamente hacia Ciudad de Darío y el embalse La Virgen. Similares resultados fueron encontrados por Flores (2004). Tahal Consulting Engineer Ltda (1977), que identificaron como fuente de recarga: los bordes del Valle, a través del lecho de los ríos, recarga directa y recarga de retorno por riego.

De acuerdo con Tahal Consulting Engineer Ltda (1977), las transmisividades – del valle de Sébaco oscilan desde 29 m²/día en los pozos de la zona de Ciudad Darío, hasta casi 4,000 m²/día en la zona central del valle, sin que se observe una distribución uniforme de las transmisividades en toda el área.

En los pozos ubicados en la parte noreste del valle (zona circundante a la batería de pozos que abastecen a la ciudad de Matagalpa y del cultivo de arroz) el bombeo ha provocado el cambio de la dirección del flujo natural del acuífero, debido al incremento de la demanda por parte de la población Matagalpina. Asimismo, algunos pozos que son de uso agrícola (pozos de extracción de agua para riego por gravedad para el cultivo del arroz) provocan redireccionamiento del flujo del agua subterránea.

Ante tal contexto, a pesar de su gran potencial, parece poco factible considerar al acuífero de Sébaco como una alternativa viable en momentos de sequía, debido a la presión a la cual es sometido el recurso.

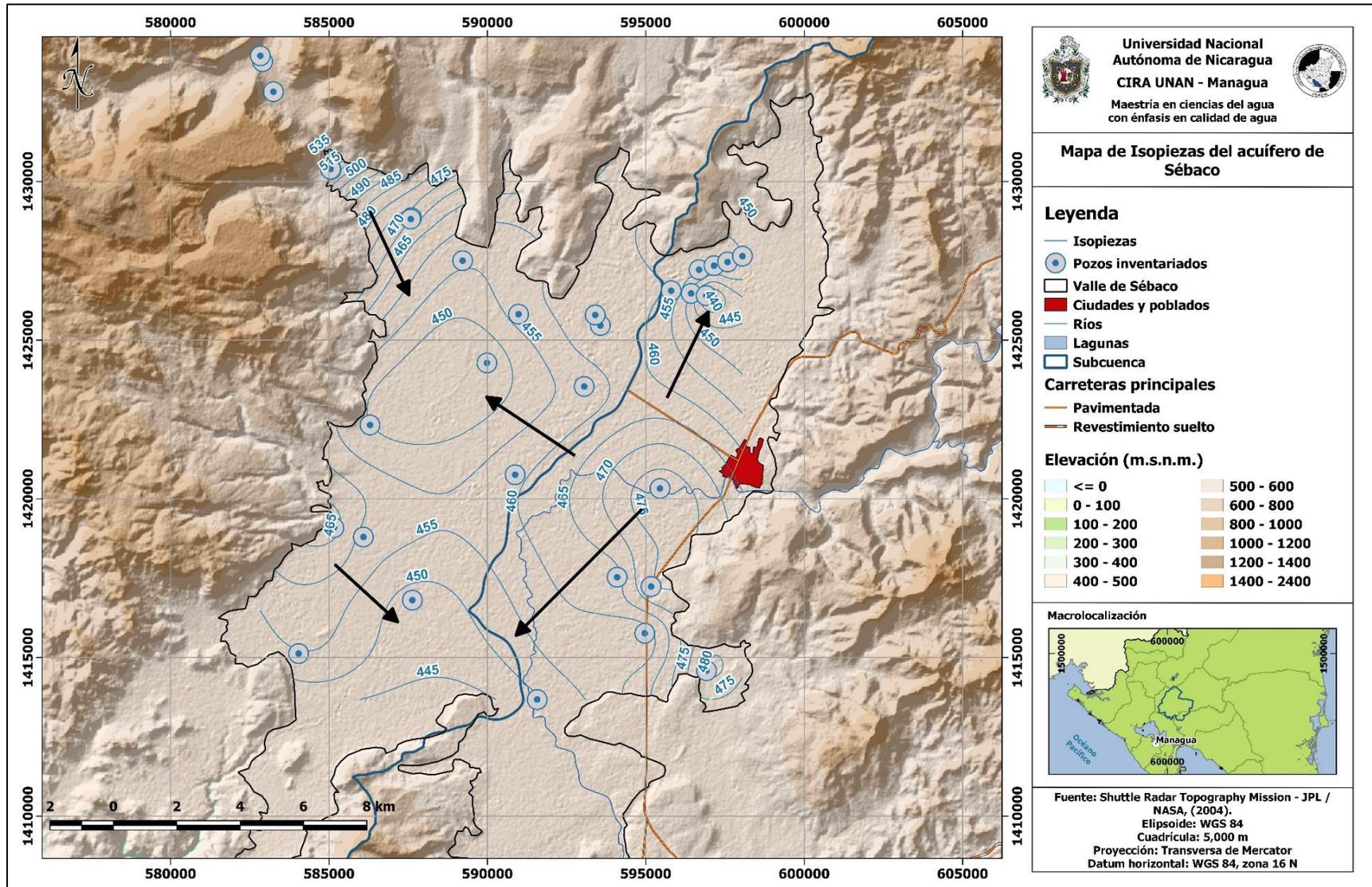


Figura 43. Mapa de isopiezas y comportamiento del flujo subterráneo en el valle de Sábaco.

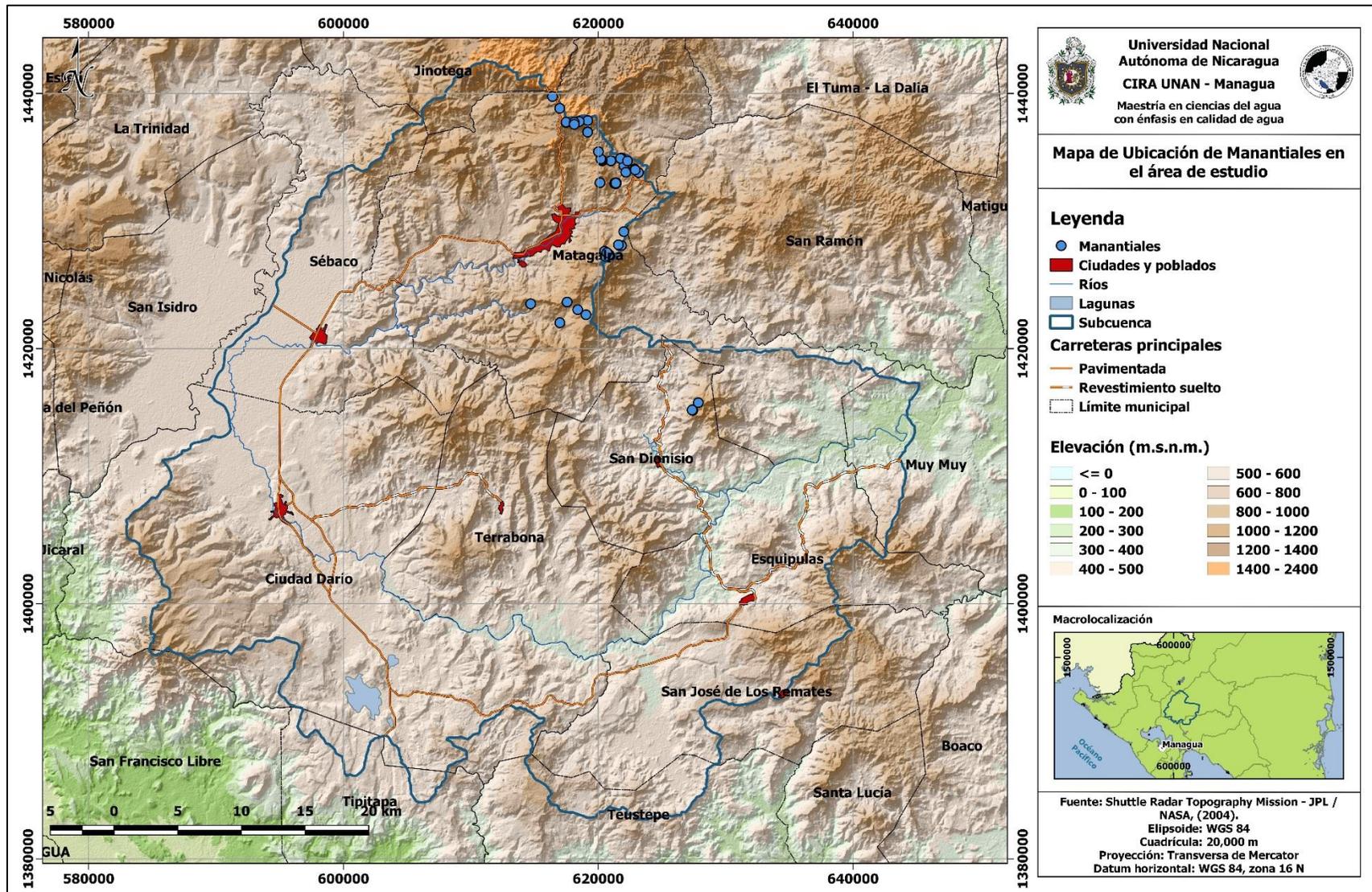


Figura 44. Mapa de ubicación de Manantiales en el área de estudio.

Los manantiales representados en la figura 44, representan una muestra de la descarga local de agua subterránea, localizados en su mayoría en las cabeceras de los principales ríos que conforman a la subcuenca.

Muchos de los manantiales son utilizados como fuente de agua para consumo humano. Su heterogeneidad entre un manantial y otro es clara, condicionado por la geología predominante en la zona.

A continuación, se presenta algunos de las variables obtenidas de los manantiales reflejados en la figura 44 en la presente investigación:

Cuadro 21. Caudales de manantiales de la subcuenca

Nombre	Comunidad	Altitud (msnm)	Caudal Verano (m ³ /h)	Caudal Invierno (m ³ /h)	Familias atendidas	Caudal por familia verano (l/día/fam.)
Jucuapa Centro	Jucuapa	891	1.2	6	93	309.68
Jucuapa Arriba	Jucuapa	1,082	3.73	-	53	1,688.83
Maderas	Mercedes	920	0.5	-	30	399.35
Mercedes 1	Mercedes	1,000	1.88	-	70	643.96
Josefina	Josefina	1,128	-	-	25	-
Susulí	Susulí	879	10.22	13.63	320	766.46
Jícaro	Jícaro	881	2.37	-	NA	-
Zapote arriba	Zapote	944	0.69	-	40	416.67
Cartuja	Molino Norte	1,112	6.95	-	150	1,111.68
Lipes	Lipes	1,232	5.28	-	70	1,808.75
Naranjo	Naranjo	1,485	0.92	-	43	516.22
Fuente Pura	Fuente Pura	1,450	-	-	13	-
Galera	Galera	1,287	9.41	-	165	1,368.99

Fuente: Elaboración propia.

El acceso al recurso agua se desarrolla en un contexto heterogéneo. Por un lado, ciertas comunidades de la subcuenca adolecen del recurso en cantidades suficientes para satisfacer sus necesidades básicas, restringidas a unas cuantas

horas al día a intervalos que van desde un día a más.

Cuadro 22. Caudales de Pozos Inventariados en la subcuenca

Nombre	Comunidad	Profundidad del NEA (m)	Caudal Extraído (m ³ /h)	Familias atendidas
Centro de Salud	Los prados	11.42	-	-
Pozo comunal	Los prados	7.64	13	310
Pozo comunal	Papayal	6.85	-	10
Peñas	Pencas	11.04	5.625	120
Pozo comunal	Tempisque n° 1	7.53	-	39
Ojo de agua	Tamalapa	10.28	0.024	52
Los Llanos	Los Llanos	38.45	-	33
Pozo ENACAL	Ciudad Darío	48.965	-	-
San Vicente	Tecomapa	26.41	-	-
Las Pilas n° 1	Darío	16.28	-	-
Pozo ENACAL	Calabazas	39.61	29	-
Las Delicias	Juanillo	8.01	-	218
Entrada a las Delicias	Delicias	10.05	2	-
Pozo comunal	Zapote	8.755	-	-
San Martín	Piedra Colorada	13.59	-	14
Los Valles	Piedra Colorada	8.2694	-	8
Guapinol	Piedra Colorada	18.14	-	7
Central	Piedra Colorada	8.37	-	-
Zapote Arriba	Zapote	2.48	-	-
Molino Norte	Molino Norte	6.62	-	-
Escuelita	El Hato	41.64	-	-
Achiote	Achiote	3.93	-	8
San Andrés	San Andrés	8	-	18
Cuajiniquil	Cuajiniquil	16.15	-	-
Terrabona	Terrabona	17.05	31	512
Hato	Hato	4.8	-	32

Fuente: Elaboración propia.

El manantial con mayor caudal de los medidos en el presente estudio está ubicado en la comunidad de Susulí.

Este abastece a un mayor número de familias por lo que parece poco probable que el excedente de este manantial pueda ser utilizado en sistemas de riego. Manantiales tales como los que se localizan en los Lipes, la Galera y Jucuapa arriba parece ofrecer esta posibilidad, particularmente el último, en vista que los períodos de retorno en esta área, son más cortos a diferentes magnitudes de sequía, además de ser una zona productora de granos básicos.

El denominador común entre todos los manantiales muestreados es que carecen de las debidas medidas pertinentes para su preservación (solo un comité admitió que realizaron la compra de 4.5 manzanas de tierra para salvaguardar el manantial).

Los manantiales cuentan con un perímetro pequeño de área de captación, por lo que pone en riesgo la disponibilidad del recurso en años venideros, particularmente cuando aparece la sequía. Además de esto, en su cercanía se cultivan frijoles, maíz etc., lo que puede llegar a causar contaminación del agua, exacerbando las consecuencias del fenómeno.

Sin lugar a duda, el agua de pozos abastece a mayor número de habitantes por unidad de fuente (98.64 familias en promedio), en relación con los manantiales (89.33 familias). En promedio, la profundidad del nivel estático del agua (en los pozos muestreados) se encuentra a 15.40 m, con un máximo de 48.965 m y un mínimo de 2.48 m.

El recurso parece estar confinado a pequeños valles intramontanos, acuíferos colgados y zonas de fracturas. Por tanto, su uso y aprovechamiento debe estar basado en estudios hidrogeológicos a detalle, que permitan identificar aspectos técnicos, así como medidas para la preservación del recurso.

4.3.4. Infraestructura

4.3.4.1. Captación de agua

Si bien es cierto que los reservorios para la captación de agua son de diferentes formas y capacidades, el objetivo de su establecimiento es recolectar agua de lluvia o de escorrentía para almacenarla por cierto tiempo, a fin de suplir la demanda hídrica del cultivo (también puede ser doméstica y pecuaria) en sitios críticos en el tiempo.

Bendaña (2012) indica las siguientes ventajas:

- ✓ Sistema independiente y, por lo tanto, ideal para comunidades dispersas y alejadas.
- ✓ En su construcción e instalación se emplea mano de obra local o familiar y pueden usarse materiales locales para su captación.
- ✓ No hay demanda de energía para la operación del sistema.
- ✓ De fácil mantenimiento y comodidad y ahorro de tiempo en la recolección del agua.

Los volúmenes de agua pueden variar de acuerdo al cultivo, la variedad, localización, variación de las precipitaciones y la época de siembra. En términos generales, en conformidad con el acápite 4.3.3.1., el volumen requerido para los cultivos de frijol y maíz es de 2,599.62 m³ de agua por manzana (2.6 millones de litros de agua, sin tomar en cuenta el tipo de suelo y otros factores). Tal cantidad parece absurda si se toma en cuenta las dimensiones de la obra.

No obstante, debe recordarse que estas obras son construidas con la finalidad de distribuir el recurso en el tiempo, particularmente cuando las precipitaciones son errantes en las fechas de su aparición. Ante esto, parece lógico la construcción de reservorios tipo laguneta capaz de sustentar los volúmenes de agua necesarios para suplir las necesidades de riego. No obstante, otras formas de captación de agua pueden implementarse en concordancia con los recursos económicos y

tecnológicos del productor o la comunidad.

Entre ellos pueden citarse tanque de ferrocemento (ver anexo 8.1), reservorios de ladera (ver anexo 8.2), represas pequeñas aprovechando cárcavas (ver anexo 8.3), zanjales de almacenamiento revestidas (ver anexo 8.4).

La construcción de la obra en sí para la captación de agua requiere de una inversión inicial que debe ser sufragada por el productor, la comunidad o incluso las instancias gubernamentales pertinentes de acuerdo a la zona donde se desea implementar. Esta última opción parece lógica siempre y cuando se creen los mecanismos adecuados que permitan la transparencia de los recursos utilizados.

4.3.4.2. Riego por goteo

El riego por goteo, es un tipo de irrigación que suministra agua de manera lenta y uniforme a baja presión a través de mangueras de plástico instaladas dentro o cerca de la zona radicular de las plantas (Shock y Welch, 2013). Este tipo de tecnología, si bien es cierto lleva varios años en el mercado, su aplicación resulta importante en zonas que presenta recurrentes sequía y bajas precipitaciones (Municipios de Sébaco, Darío y Terrabona).

De acuerdo con Leveratto (2005), el riego por goteo presenta las siguientes ventajas:

- ✓ Al reducirse la zona húmeda, se reduce la cantidad de malezas.
- ✓ Requiere de menor volumen de agua por lo que constituye el método más eficiente en el uso de agua.
- ✓ Se reducen las pérdidas por infiltración profunda.
- ✓ Se eliminan los escurrimientos que se produce en el riego por gravedad.
- ✓ Mayor uniformidad de riego.

La primera dificultad que presenta esta tecnología es su alto costo, así como la necesidad de personal calificado.

4.3.5. Prevención

4.3.5.1. Comisión para la mitigación de los efectos de la sequía en la subcuenca Río Grande de Matagalpa (COMISEMA)

Tradicionalmente en Nicaragua la implementación de medidas y acciones para mitigar los efectos de la sequía se ha llevado bajo un enfoque reactivo, es decir, se adopta un conjunto de actividades después del comienzo de la sequía y una vez ésta se haya percibido.

Es por ello, que es necesario implementar un enfoque tipo proactivo. De acuerdo con Ameziane *et al.*, (s.f.) un enfoque proactivo o preventivo incluye todas las medidas diseñadas con antelación, con unas herramientas de planificación adecuadas y la participación de los grupos de interés.

Bajo este enfoque se recomienda constituir un órgano democrático que tiene por meta, planificar las medidas y acciones referente a la mitigación de la sequía en la subcuenca, conformado por cada uno de los grupos de interés que desarrolla algún tipo de labor en el área.

Los grupos de interés para la subcuenca Río Grande de Matagalpa son: Asociación de productores o productores individuales (P/e: CECOCAFEN, ANAR, etc.), instituciones gubernamentales referentes al sector agropecuario y temas ambiental (MAG, INTA, INETER, INTUR, ANA, INAFOR, SINAPRED, MARENA), alcaldías, ONG´s (COSUDE, ADDAC, Caritas, CATIE, UNAG, etc), Universidades (UNAN, UNN, UNA, etc.).

Se vuelve necesaria la constitución legal ante el estado, declarando sus funciones de forma clara, así como otra información relacionada con la comisión. Los fondos pueden proceder bien sea del arca estatal o de mecanismos de fideicomiso reglamentado por los grupos de interés.

4.3.5.2. Comunicación y sensibilización del riesgo

El establecimiento de redes de comunicación efectivas, entre los diferentes grupos

de interés, debe constituir un eje central en la planificación de las estrategias productivas, a fin de que los beneficios sean traducidos a nivel económico, ambiental, social y cultural.

El COMISEMA descrito en el anterior acápite, pretender cumplir con este objetivo. Sin embargo, la articulación de procesos debe ir más allá de establecer las reglas del juego (comunicación), debe permitir la apropiación de tales reglas, no solo a nivel de dirigentes, sino de cada una de las familias que habitan en la cuenca. Ante tal hecho, la divulgación y consulta de lo generado por la planificación, debe producirse de manera masiva, permitiendo crear espacios de discusión y de esta manera el establecimiento de mecanismos de flujo de información del tipo horizontal.

Se debe hacer uso de los principales medios de comunicación (televisión, periódico, radio, etc.), así como de jornadas de sensibilización (charlas).

4.3.5.3. Planificación de las estrategias productivas en la subcuenca

La heterogeneidad existente en la Subcuenca, tanto a nivel físico como socioeconómico, provoca que las estrategias previamente expuestas en el presente documento, no se ajusten en su totalidad al contexto de la subcuenca, sino que solamente sean válidas para ciertos territorios dentro de la subcuenca. Por tanto, la planificación de las estrategias debe integrar a los diferentes actores, respetando estas diferencias.

El diseño de estrategias efectivas basadas en el riesgo, que mitiguen los efectos de la sequía en la agricultura y los sistemas de abastecimiento de agua depende en última instancia del papel de las organizaciones, instituciones y grupos de interés civiles afectados por la sequía en cada caso (Ameziane *et al*, s.f.). (ver figura 45).

Ante tal afirmación, es necesario que los grupos de interés se sometan a un proceso de planificación.

El componente organizativo, pretende reunir a los diferentes grupos de interés, a

fin de entender el marco institucional, legal social o natural en el cual se desenvuelven.

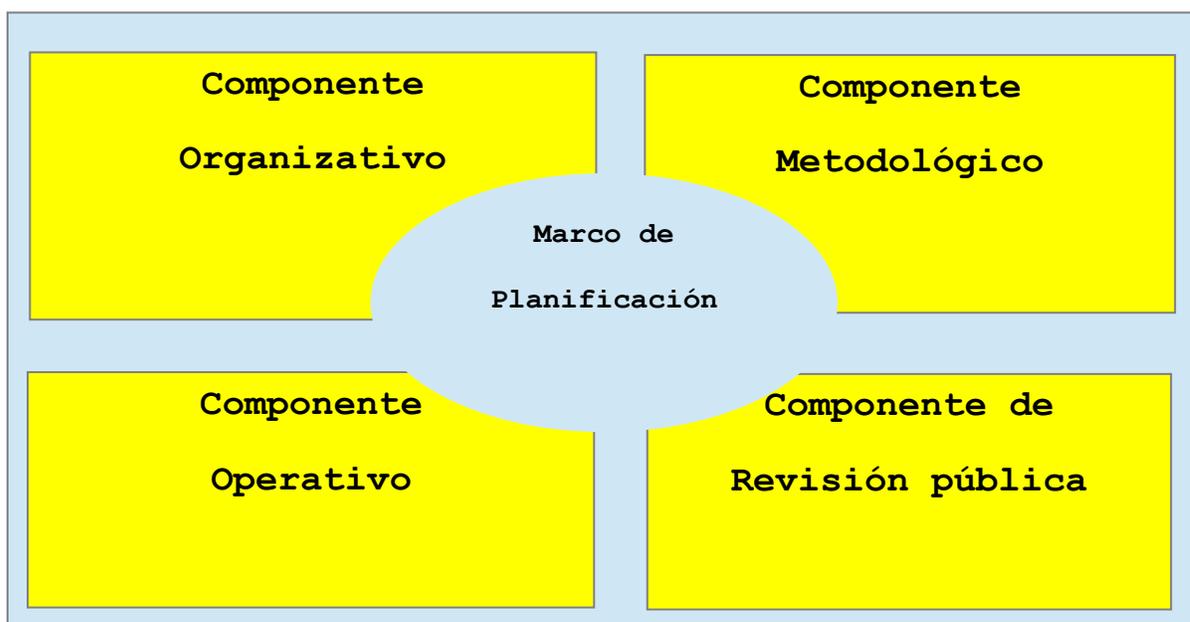


Figura 45. Componentes de la planificación. Fuente: Ameziane et al., (s.f).

Se debe enfatizar la recopilación de información necesaria para entender los alcances de las medidas de mitigación, dar a conocer resultados acerca de la sequía, experiencias, etc. Es preciso recordar, que en este componente se debe constituir el COMISEMA descrito en el acápite 4.3.5.1.

El componente metodológico, pretende establecer los lineamientos a seguir y documentados en la presente investigación, para elegir, no solo la estrategia pertinente al territorio, sino también como llevarla a cabo (logística). Es indispensable en este componente, establecer indicadores que permitan medir si las estrategias están siendo efectivas ante la sequía.

El componente de revisión pública, debe ejecutarse con el propósito de que exista una adecuada apropiación por parte de los diferentes actores y a quienes representan. Elementos de crítica y autocrítica deben fomentarse, para crear mecanismos efectivos de democracia. El último componente (operativo) debe ejecutarse buscando la transparencia de los fondos que se pretenda administrar, modificando las actividades de acuerdo al comportamiento de los indicadores planteados.

V. CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

A lo largo de los períodos registrados por las diferentes estaciones de precipitación de la subcuenca han ocurrido un total de 10 sequías meteorológicas severa, 6 de ellas se manifestaron en más de 3 estaciones; una o más estaciones son clasificadas como “sequía severa” (>45 % de precipitación bajo la norma histórica).

Las sequías agrícolas en los meses de septiembre y octubre se correlacionan con sequías meteorológicas moderadas y severas a nivel anual. Estos meses se ubican en las épocas de mayor importancia en el país desde el punto de vista productivo.

Las sequías meteorológicas moderadas y severas reducen a más de la mitad el caudal con probabilidad de excedencia del 50 %.

A partir de las observaciones de las estaciones se conformaron 3 regiones candidatas a regionalización: Norte, centro y valle. Sin embargo, solo en las regiones centro y valle se establece el Análisis Regional de Frecuencia.

Las distribuciones Normal Generalizada (GNO) y Person tipo III (PE3) se ajustan a las observaciones de las regiones del Centro y Valle respectivamente, lo que indica un comportamiento altamente heterogéneo de la amenaza en la subcuenca.

Sequías asociadas a la reducción de la precipitación media anual por el orden del 15 % tienen períodos de retorno de entre 2 y 3 años, siendo más recurrente en la localidad de Quebrada honda (2 años).

Sequías asociadas a la reducción de la precipitación media anual por el orden del 30%, tienen períodos de retorno que varían desde menos de 5 años hasta 20 años.

Sequías asociadas a la reducción de la precipitación media anual por el orden del 45%, tienen períodos de retorno que varían desde 5 años hasta más de 50 años.

Las áreas más susceptibles a la sequía en la subcuenca se localizan hacia el noroeste y oeste de la misma, alrededor de la comunidad de Quebrada honda.

Los períodos de retorno aumentan a medida que aumentan la longitud y la altitud en la subcuenca en estudio.

Las prácticas productivas son imprescindibles para lograr la adaptación ante la amenaza de sequía en el sector, particularmente en zonas con mayor recurrencia del fenómeno, por lo que propone estrategias tales como el uso de variedades resistentes o tolerantes al fenómeno, obras de conservación de agua y suelo, tecnologías de optimización del recurso, recolección de agua y la planificación de las acciones pertinentes en subconjunto con todos los actores que intervienen en el sector dentro de la subcuenca.

Las principales fuentes disponibles, tanto superficiales como subterráneas, no tienen la capacidad en la actualidad para sustentar las diferentes actividades que existen en la subcuenca, por lo que es necesario realizar una gestión integrada del recurso, poniendo en práctica acciones tales como el ordenamiento territorial por uso potencial del suelo, aplicación de sistemas agroforestales y conservación de agua y suelo.

VI. CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES

Realizar estudios evaluando los efectos de la disminución del agua sobre el rendimiento de diferentes cultivos, identificando los mecanismos fisiológicos más importantes, con el propósito de mejorar el banco genético del país ante dicha amenaza.

Realizar estudios sobre factibilidad de sitios para construcción de cosecha de agua.

Se recomienda el siguiente orden de prioridad de trabajo ante la amenaza de sequía para aunar esfuerzo, capital financiero, técnico y humano: Entre Matagalpa y Sébaco (alrededores del poblado Quebrada Honda), municipios de Terrabona y Darío, municipios de Esquipulas y San Dionisio, municipio de Sébaco y San Isidro, parte alta de la subcuenca.

Las estrategias productivas para la adaptación de la amenaza de la sequía deben de estar orientadas a un conjunto de prácticas que permita la captación de agua, humedad en el suelo y el mejoramiento de cultivos, basada en la planificación temprana y efectiva.

VII. CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, Y. 2006. El cambio climático en Centroamérica: Manifestaciones, riesgos y adaptación. San Salvador, El Salvador: CRRH.

Allen, R. Pereira, L. Raes, D. y Smith, M. 2006. Evapotranspiración de cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua en el cultivo. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Álvarez, M. Puertas, J. Soto, B y Díaz-Fierros, F. 1999. Análisis Regional de las precipitaciones máximas en Galicia mediante el método del índice de avenida. Revista ingeniería del agua. Coruña, España.

Ameziane, T. Belghiti, M. Benbeniste, S. Bergaoui, M. Bonaccorso, B. Cancelliere, A. Cristophides, T. Confederación hidrográfica del Tajo, Cubillo, F. Euchi, L. Gabiña, D. Garrido, A. Garrote, L. Hajispyrou, S. Ibañez, J. Iglesias, A. Keravnou, E. Lapeña, A. Lebdi, F. López, A. Louati, M. Mathlouthi, M. Mellouli, H. Moneo, M. Ouassou, A. Pangalou, D. Pashardes, P. Quiroga, S. Rossi, G. Rostandi, N. Saracoglu, D. Sibou, T. Tigkas, D. Tsakiris, G. Tsiourtis, N. Vangelis, C. y Ziyad, A. s.f. Guía de la gestión de la sequía. Madrid, España: Comisión Europea, MEDA Water, MEDROPLAN.

Avella, R. 2001. Efectos de la sequía sobre inflación en Colombia. Bogotá, Colombia: Banco de la República de Colombia.

Ayala, G. Análisis de datos. Universidad de Valencia. Valencia, España.

Ayuso, J. 2012. Análisis Regional de Frecuencia de valores extremos. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Córdoba.

Baca, L. 2012. Nuevas variedades resistentes a la sequía. Managua, Nicaragua: Servicio Holandés de Cooperación al Desarrollo (SNV).

Below, R., Grover-Kopec, E., y Dilley, M. 2007. Documenting Drought-Related Disasters a global reassessment. The Journal of Environment & Development.

Bendaña, G. 2012. Agua, agricultura y seguridad alimentaria en las zonas secas

de Nicaragua. Primera edición. Managua, Nicaragua: Acción contra el hambre, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación y Unión Europea.

Bodman, G., y Mahmud, A. 1931. The use of the moisture equivalent in the textural classification of soils. California, U.S.A.: University of California.

Breña, A. 2004. Precipitación y Recursos Hidráulicos en México y Centroamérica. México D.F., México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Butler, S. 1957. Engineering Hydrology. Prentice Hall. USA.

Cardona, A. 1993. Evaluación de la Amenaza, la Vulnerabilidad y el riesgo: Elementos para el ordenamiento y la planeación del Desarrollo.

Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). 2012. Escenarios de Impacto del clima futuro en áreas del cultivo de café en Nicaragua. Cali, Colombia. Chapingo. División de Ciencias Forestales. 120 p.

Chen, Y., Huang, G., Shao, Q., y Xu, C. 2006. Regional analysis of low flow using L-moments for Dongjiang basin, South China. Hong kong, China: Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques.

Chow, V., Maidament, D., y Mays, L. 1992. Hidrología probabilística. McGraw Hill.

Crespo, G. 2008. Sequía. Puebla, México: Colegio de Post graduados de Puebla (COLPOS).

Dragovic, R. 1997. Circunstancias que conducen a una sequía. Moscú, Rusia: Miliarium Aureum S.L.

Elming, S. y Rasmusen, T. 1997. Results of magnetotelluric and gravimetric measurements in western Nicaragua, Central America. Suecia: Geophys.

Elrick, D. Reynolds, W. y Tan, K. 1989. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. Ground Water Monit. Rev.

Erro, J. 2011. Análisis Regional de las precipitaciones diarias extremas en la

cuenca del río Arga. Pamplona, España: Universidad Pública de Navarra.

Escoto, S. Mungía, P. Elvir, L. Escorcía, R. Miranda, J. Benavides, S. Flores, E. y Gutiérrez, A. 2008. Sistematización del cultivo de maíz de alta calidad de proteína en la zona de intervención de CARITAS Matagalpa. Estelí, Nicaragua: Catholic Relief Services (CRS).

Espín, D. 2000. Guía para la mitigación de los efectos de la sequía. España: German Association for water.

Estrada, R., Lemus, D., Mendoza, D., y Rodríguez, V. 2010. Hidrogeles biopoliméricos potencialmente aplicables en la agricultura. Puebla, México: Revista Iberoamericana de polímeros.

Flores, Y. 2004. Criterios hidrogeológicos para la formulación de un plan de gestión en el acuífero del Valle de Sébaco. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.

Gámez, W. 2009. Texto básico de Hidrología. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria.

Giraldo, R. s.f. Introducción a la Geoestadística: Teoría y aplicación. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

González, E. Rodas, J. Abreu R. y Merino, A. s.f. Hidrogel como medio sustentante y nutritivo en el cultivo de la Espinaca. Cuernava, México: Universidad Nacional de México (UNAM).

González, M. 1997. Factores que determinan el régimen de la precipitación en Argentina subtropical. Buenos aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

Guelman, E., y Cunha, M. 2000. Estudo de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro. Río de Janeiro, Brasil: Revista e ampliada.

Hallack-Alegria, M., y Watkins, D. 2007. Annual and Warn Season Drought Intensity-Duration-Frecuency Analysis for Sonora. Sonora, México: Journal of Climate.

Hengl, T. 2009. A Practical Guide to Geostatistical Mapping. Amsterdam, Holanda: University of Amsterdam.

Hodgson, G. 2000. Introducción al léxico estratigráfico de Nicaragua. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.

Hosking, J., & Wallis, J. 1997. Regional Frequency Analysis: An Approach based on L-Moments. Cambridge.

Idrobo, H., Rodríguez, A., y Díaz, J. 2010. Comportamiento del hidrogel en suelos arenosos. Colombia: Redalyc.

Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE) 2011. Guía técnica para el cultivo de café. Primera edición. Heredia, Costa Rica: ICAFFE-CICAFFE.

Instituto Nacional de Información para el Desarrollo (INIDE). 2005. Censo 2005. Managua, Nicaragua: Gobierno de Nicaragua.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) 2005. Sequía Meteorológica. Mapas de Amenaza. Managua, Nicaragua: Gobierno de Nicaragua.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). s.f. El Niño y su relación con el régimen de Precipitación en Nicaragua. Managua, Nicaragua: Gobierno de Nicaragua.

Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA) 2009. Cultivo de Frijol: Guía tecnológica para la producción de frijol común. Segunda edición. Managua, Nicaragua: Gobierno de Nicaragua.

Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA) 2009. INTA desarrolla variedad de frijol resistente a la sequía. Managua, Nicaragua: Gobierno de Nicaragua.

Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA) 2010. Cultivo del Maíz: Guía Tecnológica para la producción de Maíz. Segunda edición. Managua, Nicaragua: Gobierno de Nicaragua.

Kite, G. 1977. Frequency and risk analyses in hydrology. Colorado, U.S.A. Water

resource Publications.

Lambers H, Chapin, F. y Pons T. 1998. Plant physiological ecology. Springer Verlag. Berlin. 384 p.

Leveratto, C. 2005. Riego por goteo en la huerta comunitaria. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y Ministerio de Desarrollo Social.

Linsley, R., Kohler, M. y Pauls, L. 1958. Hydrology for engienners. Mac Graw Hill. New York, USA.

Loma, E., García, A., Córdoba, M. y Monjo, R. 2014. Escenarios del clima futuro para maíz y frijol: Caminos para la Adaptación en Nicaragua. Madrid, España: Instituto de Estudios del Hambre.

López T. G. 2007. Sistemas agro forestales 8. SAGARPA. Subsecretaría de Desarrollo Rural. Colegio de Post-graduados. Puebla. 8 p.

López, N. 2014. Zonas de recargas hídricas. CATIE. Managua, Nicaragua.

Loucks, D., y Van Beek, E. 2005. Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Aplications. París, Francia: UNESCO.

Martínez, R. Melgarejo, P. Salazar, D. y Valero, R. 2003. Contribución al estudio comparativo entre la eficiencia del riego por goteo y microaspersión en aguacatero (Persa americana) con relación al área mojada en saturación del suelo. España: Universidad Miguel Hernández de Elche y Universidad Politécnica de Valencia.

Maskrey, A. 1993. Los desastres no son naturales. Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina.

Medina, G. 2012. Perfil de Gestión de Riesgo y Plan de Contingencia del municipio de Totogalpa con un enfoque de preparación ante sequías. Totogalpa, Nicaragua: Alcaldía de Totogalpa, Acción contra el Hambre, FAO y Unión Europea.

Meza, L., Corso, S. y Soza, S. 2010. Gestión del riesgo de sequía y otros eventos

climáticos extremos en Chile. Roma, Italia: FAO.

Meza, L., Corso, S., & Soza, S. 2010. Gestión del riesgo de sequía y otros eventos climáticos extremos en Chile. Roma, Italia: FAO: Oficina de Estudios y Políticas Agrarias.

Ministerio Agropecuario y Forestal (MAGFOR). 2002. Estrategias para el manejo de la Sequía. Managua, Nicaragua: Gobierno de Nicaragua.

Ministerio Agropecuario y Forestal (MAGFOR). 2013. Plan de Adaptación a la Variabilidad y el Cambio Climático en el sector Agropecuario, Forestal y Pesca en Nicaragua. Managua, Nicaragua: Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional, Gobierno de Nicaragua.

Ministerio de Recursos Naturales (MARENA) 2010. Caracterización de la cuenca N° 55, río Grande de Matagalpa. Managua, Nicaragua: Gobierno de Nicaragua.

Múgica, L. 2011. Efectos del manejo de residuos de *Lolium multiflorum* dejados en campo sobre la fauna microbiana y la actividad enzimática del suelo. Iraila, España: Universidad Pública de Navarra: Escuela técnica superior de ingeniería agronómica.

Musálem S. M. A. 2001. Sistemas agro silvopastoriles. México: Universidad Autónoma de Chapingo y CONAFOR.

Norbiato, D., Borga, M., Sangati, M., y Zanon, F. 2007. Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. Italia: Journal of Hydrology.

Núñez, J. 2011. Introducción a la hidrología probabilística. Santiago de Chile, Chile: CALAZAC.

Núñez, J., Verbist, K., Ramírez, J., y Hallack, M. 2010. Guía metodológica para la aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de precipitaciones basados en L-Momentos y resultados de aplicación en América Latina. Montevideo, Uruguay: CALAZAC y UNESCO.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2012. Marco Estratégico Regional para la gestión de riesgo climático en el sector agrícola del corredor seco Centroamericano. Roma, Italia.

Palma, M., y Tórrez, E. 2011. Capacidad de infiltración, en las posibles zonas de recarga hídrica de las subcuencas de Molino Norte y San Francisco, Matagalpa, 2011. Matagalpa, Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Facultad Regional Multidisciplinaria de Matagalpa.

Pedroza, M. 2012. Promoviendo un enfoque sistemático de los Métodos de Investigación. Managua, Nicaragua: VRIPEU-UNAN.

Reynolds, W., Elrick, D., Youngs, E. y Amoozegar, A. 2002. Poned Infiltration from a single ring. Soil Sci. Soc.Am. J.

Sáenz, A. 2012. Métodos estadísticos con R y R Comander.España: Universidad de Jáen.

Sánchez, J. 2004. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves. Universidad de Salamanca: Departamento de Geología.

Schaefer, M., Barker, B., Taylor, G., y Wallis, J. 2006. Regional precipitation frequency analysis and spatial mapping for 24 hour and 2-hour durations in Estern Washington. Washington, U.S.A.: MGS Engineering Consultants, Inc and Oregon Climate Service.

Schaefer, M., Barker, G., Taylor, y Wallis, J. 2007. Regional Precipitation Frecuency analysis and spatialmapping for 24-hour precipitation for Oregon. Oregon, U.S.A.: MGC Engineering Consultants, Inc and Oregon Climate Service.

Schosinsky, G. 2006. Cálculo de recarga potencial de acuíferos mediante balance hídrico de suelos. Revista Geológica de América Central. San José, Costa rica.

Schosinsky, G. y Losilla, M. 2000. Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. Revista Geológica de América Central. San José Costa Rica.

- Servicio Geológico Nacional. 1987.** Geología de Nicaragua. Managua, Nicaragua: Gobierno de Nicaragua.
- Shock, C. y Welch, T. 2013.** Riego por goteo: Una introducción. Corvallis, EUA: Oregon State University.
- Silvac, M. 2002.** Capital Hídrico y Usos del agua en Nicaragua. Managua, Nicaragua.
- Suárez, J. 2000.** Análisis de las lluvias acumuladas extremas para cinco, diez y quince días en la región norte costera de Venezuela. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. Caracas, Venezuela.
- Tahal Consulting Engineer Ltda. 1977.** Estudio hidrológico del Valle de Sébaco. Managua, Nicaragua: Tel. Aviv.
- Taiz L., y Zeiger E. 2006.** Plant physiology, Benjamin Cummings Publ. Co., Redwood City, USA. 705 p.
- Tallaksen, L., y Hisdal, H. 1999.** Methods of regional classification of streamflow drought series. The EOF Method and L-Moments Technica.
- Thompson R., Gallardo M., Valdéz L., y Fernández M. 2007.** Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Agricultural Water Management* 88:147-158
- Ulrych, J., Velis, D., Woodbury, A., y Sacchi, M. 2000.** L-moments and C-moments stochastic Environmental. Research and Risk Assessment.
- UNESCO. 2006.** Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y El Caribe. Santiago de Chile, Chile: CALAZAC.
- Vargas, G. (2004).** La escala zonal, regional y local en el análisis del régimen pluviométrico del istmo centroamericano. San José, Costa Rica: Revista Reflexiones.
- Valiente, O. 2001.** Sequías, tipologías y métodos de cuantificación. Alicante, España: Redalyc, investigaciones Geográficas, Universidad de Alicante.

Veenedaal M, Swaine D, Agyeman K, Blay D, Abrebese I, y Mullins E. 1995. Differences in plant and soil water relations in and around in forest gap in West African the dry season may influence seeding establishment and survival. *Journal of Ecology* 83:83-90.

Verbist, K., Núñez, J., Soto, G., Naranjo, R., y Morales, L. s.f. Análisis Regional de Frecuencia de Sequías en la región semiárida de Chile. Santiago, Chile: Universidad de Ghent, Universidad de Chile.

Wallis, J., Schaefer, M., Barker, B. y Taylor, G. (2007). Regional precipitation-frequency analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations for Washington States. *Hydrol. Earth Syst. Sci. USA*.

Wehbe, M., Bosch, E., Granada, J., y Tarasconi, I. 2010. Riesgo sequía, impactos y manejo de riesgo en la agricultura del sur de Córdoba. Córdoba, Argentina: UNRC. Departamento de economía, facultad de ciencias económicas.

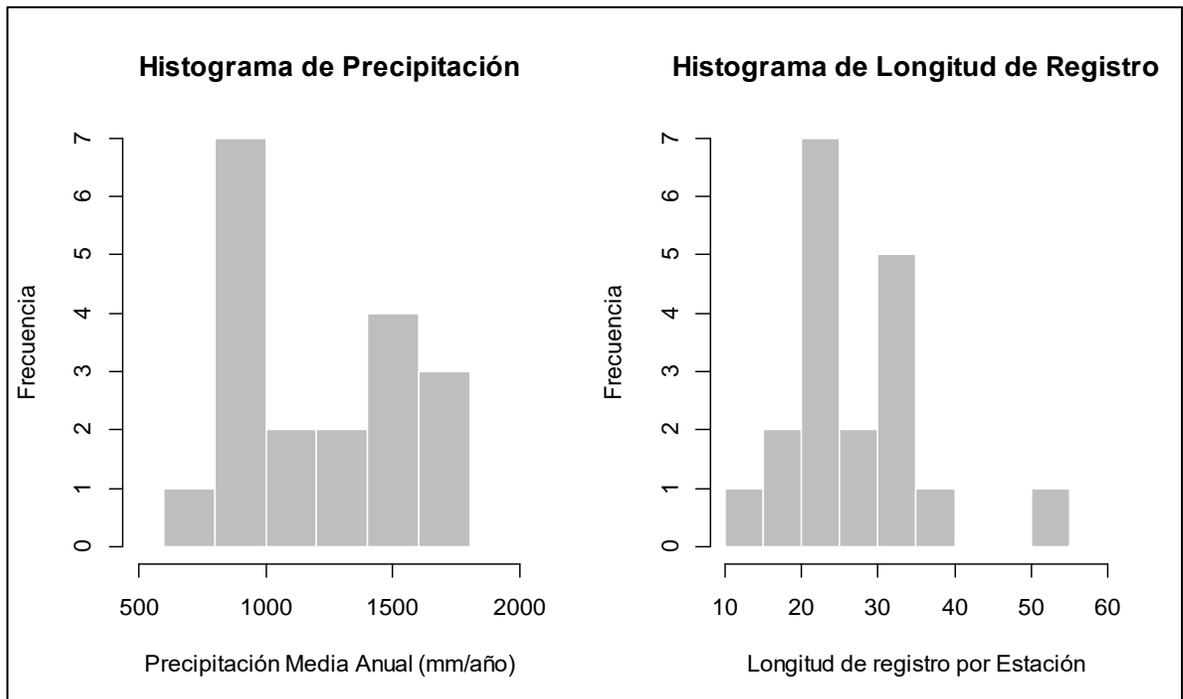
Weyls, R. 1980. *Geology of Central America*. Berlín, Alemania: Gebrüder Bornträger.

Winter, T., Harvey, J., Franke, O., y Alley, W. 1998. *Ground water and surface water: A single resource*. Denver, U.S.A.: U.S Geological Survey.

Yurekli, K., y Anli, A. 2008. Analyzing Drought Based on Annual Total Rainfalls over Tokat Province. Turquía: *International Journal of Natural and Engineering Sciences*.

VIII. CAPÍTULO 8. ANEXOS

Anexo 1. Histograma de la precipitación media anual de las estaciones analizadas.



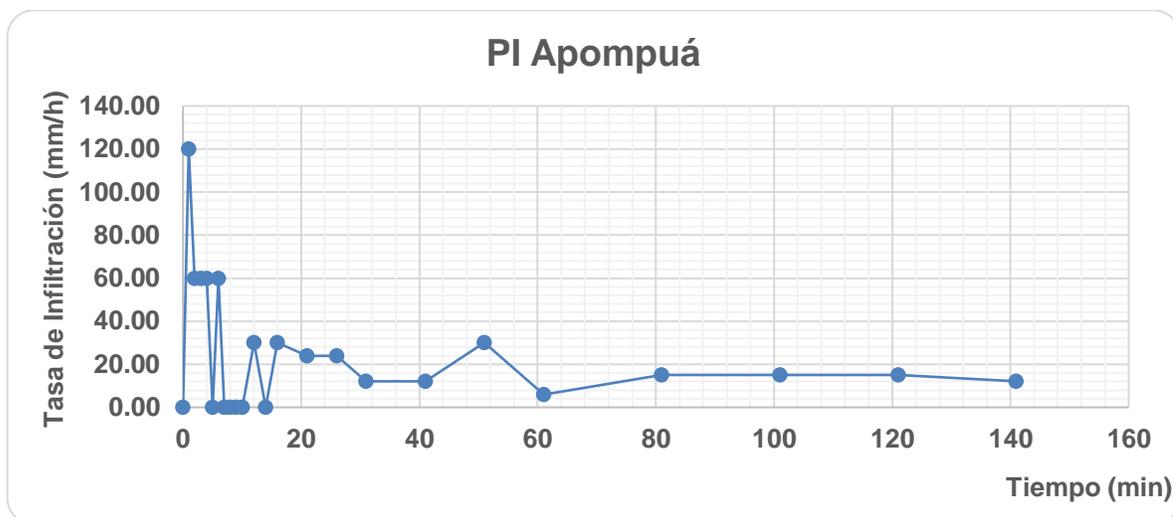
Anexo 2. Matriz de operacionalización de variables e indicadores (MOVI).

Objetivo específico	Variable	Sub variable	Indicador	Método de recolección de la información	
				Datos e información oficial	Sondeo de campo
Caracterizar el comportamiento de la sequía	Sequía	S. Meteorológica	Precipitación Evapotranspiración	x	
		S. Agrícola	Humedad del suelo	x	x
		S. Hidrométrica	Caudal Interacción río-acuífero	x	x
Estimar los períodos de retorno de sequía	Períodos de Retorno de sequía	-	Períodos de retorno de sequía	x	
Proponer prácticas productivas con base en los períodos de retorno de sequía	Prácticas productivas	Cultivo	Variedades resistentes	x	
		Suelo	Prácticas de conservación de suelo y agua Uso Potencial del suelo Sistemas agro forestales	x	

	Dotación de riego en los cultivos frijol, maíz y café	x	x
Riego	Nivel del agua subterránea e Identificación de manantiales		
Infraestructura	Captación de agua Riego por goteo	x	
Planificación	Comisión para la mitigación de los efectos de la sequía en la sub cuenca río Grande de Matagalpa	x	

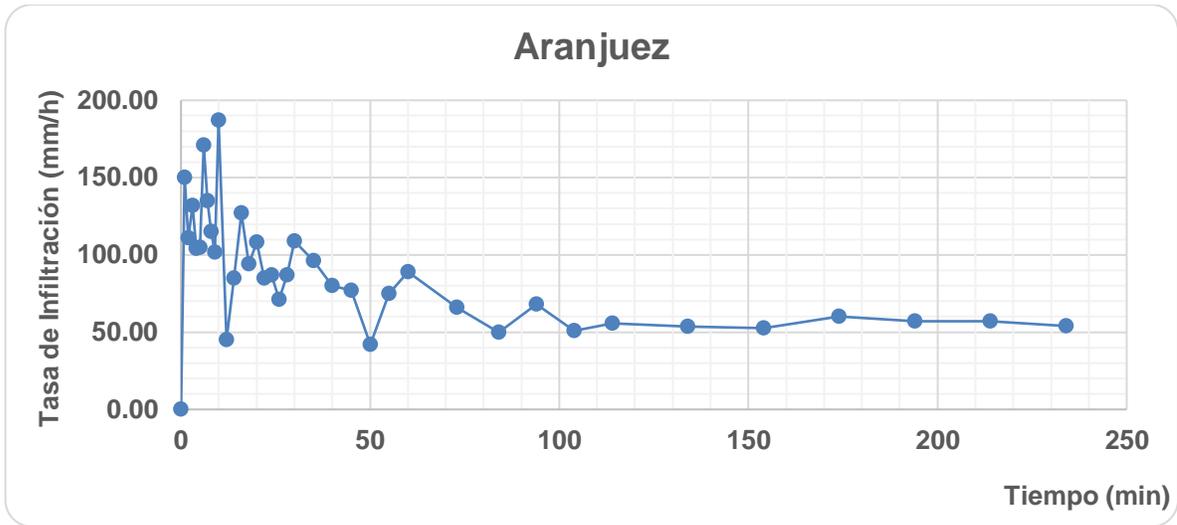
Anexo 3. Pruebas de infiltración (Gráficas y datos)

Apompuá



Intervalos	T. acum. (min)	Descenso medido (cm)	Diferencia de lectura (cm)	Tasa de Infiltración (mm/h)
0	0	20.0	0.0	0.0
1	1	19.8	0.2	120.0
1	2	19.7	0.1	60.0
1	3	19.6	0.1	60.0
1	4	19.5	0.1	60.0
1	5	19.5	0.0	0.0
1	6	19.4	0.1	60.0
1	7	19.4	0.0	0.0
1	8	19.4	0.0	0.0
1	9	19.4	0.0	0.0
1	10	19.4	0.0	0.0
2	12	19.3	0.1	30.0
2	14	19.3	0.0	0.0
2	16	19.2	0.1	30.0
5	21	19.0	0.2	24.0
5	26	18.8	0.2	24.0
5	31	18.7	0.1	12.0
10	41	18.5	0.2	12.0
10	51	18.0	0.5	30.0
10	61	17.9	0.1	6.0
20	81	17.4	0.5	15.0
20	101	16.9	0.5	15.0
20	121	16.4	0.5	15.0
20	141	16.0	0.4	12.0
Promedio (Últimas 4 mediciones)				14.3

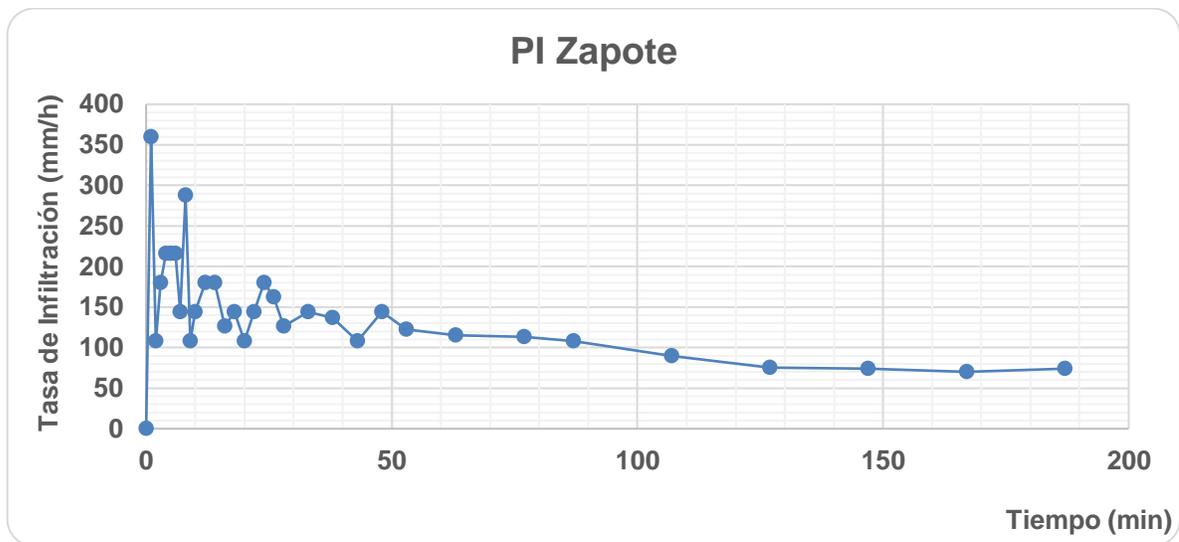
Aranjuez



Intervalos	T. acum. (min)	Lectura (cm)	Diferencia de lecturas (cm)	Tasa de Infiltración (mm/h)
0	0	20.0	0.0	0.0
1	1	19.8	0.2	150.0
1	2	19.6	0.2	111.0
1	3	19.3	0.2	132.0
1	4	19.2	0.2	104.0
1	5	19.0	0.2	104.6
1	6	18.7	0.3	171.0
1	7	18.5	0.2	135.0
1	8	18.3	0.2	115.0
1	9	18.1	0.2	101.5
1	10	17.8	0.3	187.0
2	12	17.7	0.1	45.0
2	14	17.4	0.3	85.0
2	16	17.0	0.4	127.0
2	18	16.6	0.3	94.0
2	20	16.3	0.4	108.0
2	22	16.0	0.3	85.0
2	24	15.7	0.3	87.0
2	26	15.5	0.2	71.0
2	28	15.2	0.3	87.0
2	30	14.8	0.4	109.0
5	35	14.0	0.8	96.0
5	40	13.4	0.7	80.0
5	45	12.7	0.6	77.0
5	50	12.4	0.4	42.0
5	55	11.7	0.6	75.0

0	Relleno	20.0		
5	60	19.3	0.7	89.0
13	73	17.8	1.4	66.0
11	84	16.9	0.9	50.0
10	94	15.8	1.1	68.0
10	104	14.9	0.9	51.0
10	114	14.0	0.9	55.6
20	134	12.2	1.8	53.5
20	154	10.5	1.8	52.5
0	Relleno	20.0		
20	174	18.0	2.0	60.0
20	194	16.1	1.9	57.0
20	214	14.2	1.9	57.0
20	234	12.4	1.8	54.0
Promedio (Últimas 3 mediciones)				56.0

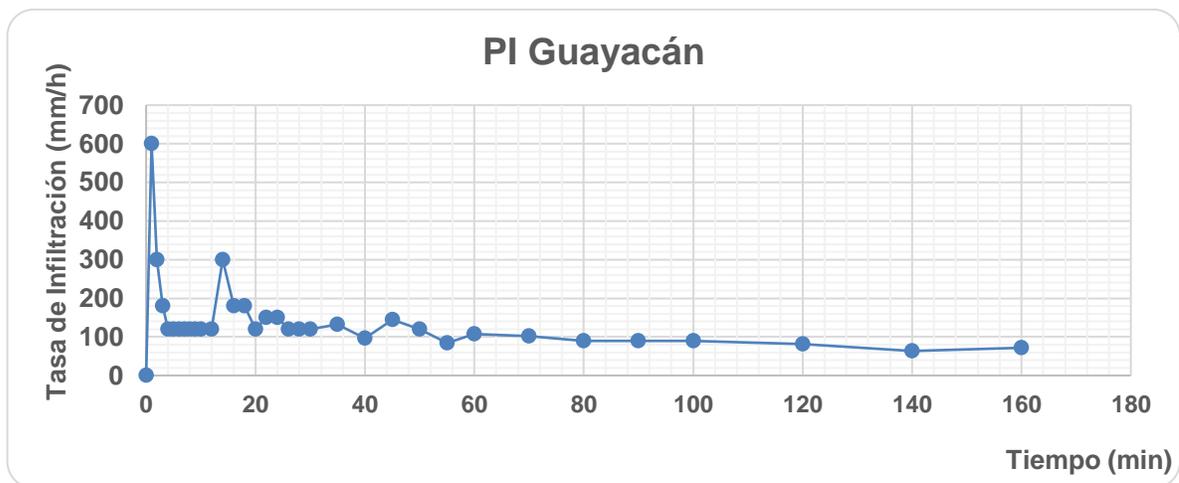
Zapote



Intervalos	T. acum. (min)	Lectura (cm)	Diferencia de lectura (cm)	Tasa de Infiltración (mm/h)
0	0	20.0	0.0	0.0
1	1	19.4	0.6	360.0
1	2	19.2	0.2	108.0
1	3	18.9	0.3	180.0
1	4	18.6	0.4	216.0
1	5	18.2	0.4	216.0
1	6	17.8	0.4	216.0
1	7	17.6	0.2	144.0
1	8	17.1	0.5	288.0
1	9	16.9	0.2	108.0
1	10	16.7	0.2	144.0

2	12	16.1	0.6	180.0
2	14	15.5	0.6	180.0
2	16	15.1	0.4	126.0
2	18	14.6	0.5	144.0
2	20	14.2	0.4	108.0
2	22	13.8	0.5	144.0
2	24	13.2	0.6	180.0
2	26	12.6	0.5	162.0
2	28	12.2	0.4	126.0
5	33	11.0	1.2	144.0
0	Relleno	20.0		
5	38	18.9	1.1	136.8
5	43	18.0	0.9	108.0
5	48	16.8	1.2	144.0
5	53	15.7	1.0	122.4
10	63	13.8	1.9	115.2
14	77	11.2	2.6	113.1
0	Relleno	20.0		
10	87	18.2	1.8	108.0
20	107	15.2	3.0	90.0
20	127	12.7	2.5	75.6
20	147	10.2	2.5	73.8
0	Relleno	20.0		
20	167	17.7	2.3	70.2
20	187	15.2	2.5	73.8
Promedio (Últimas 3 mediciones)				72.6

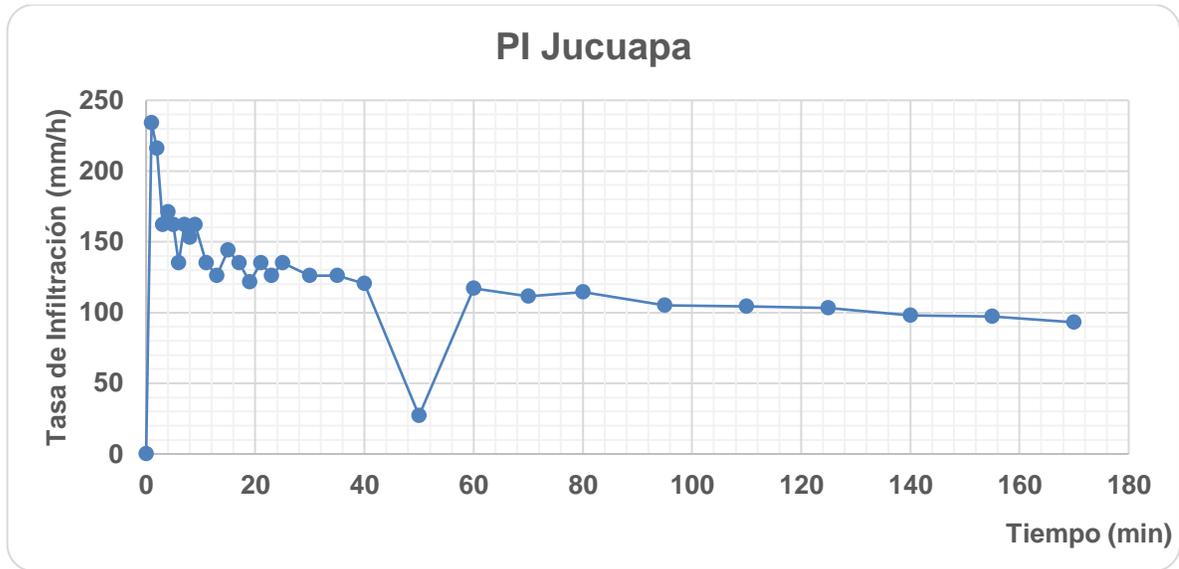
Guayacán



Intervalos	T. acum. (min)	Lectura (cm)	Diferencia de lectura (cm)	Tasa de Infiltración (mm/h)
0	0	20.0	0.0	0.0
1	1	19.0	1.0	600.0
1	2	18.5	0.5	300.0
1	3	18.2	0.3	180.0
1	4	18.0	0.2	120.0

1	5	17.8	0.2	120.0
1	6	17.6	0.2	120.0
1	7	17.4	0.2	120.0
1	8	17.2	0.2	120.0
1	9	17.0	0.2	120.0
1	10	16.8	0.2	120.0
2	12	16.4	0.4	120.0
2	14	15.4	1.0	300.0
2	16	14.8	0.6	180.0
2	18	14.2	0.6	180.0
2	20	13.8	0.4	120.0
2	22	13.3	0.5	150.0
2	24	12.8	0.5	150.0
2	26	12.4	0.4	120.0
2	28	12.0	0.4	120.0
2	30	11.6	0.4	120.0
5	35	10.5	1.1	132.0
0	Relleno	20.0		
5	40	19.2	0.8	96.0
5	45	18.0	1.2	144.0
5	50	17.0	1.0	120.0
5	55	16.3	0.7	84.0
5	60	15.4	0.9	108.0
10	70	13.7	1.7	102.0
10	80	12.2	1.5	90.0
10	90	10.7	1.5	90.0
0	Relleno	20.0		
10	100	18.5	1.5	90.0
20	120	15.8	2.7	81.0
20	140	13.7	2.1	63.0
20	160	11.3	2.4	72.0
Promedio (Últimas 8 mediciones)				87.0

Jucuapa



Intervalos	T. acum. (min)	Lectura (cm)	Diferencia de lectura (cm)	Tasa de Infiltración (mm/h)
0	0	20.0	0.0	0.0
1	1	19.6	0.4	234.0
1	2	19.3	0.4	216.0
1	3	19.0	0.3	162.0
1	4	18.7	0.3	171.0
1	5	18.4	0.3	162.0
1	6	18.2	0.2	135.0
1	7	17.9	0.3	162.0
1	8	17.7	0.3	153.0
1	9	17.4	0.3	162.0
2	11	17.0	0.4	135.0
2	13	16.5	0.4	126.0
2	15	16.1	0.5	144.0
2	17	15.6	0.4	135.0
2	19	15.2	0.4	121.5
2	21	14.8	0.4	135.0
2	23	14.3	0.4	126.0
2	25	13.9	0.4	135.0
5	30	12.8	1.1	126.0
5	35	11.8	1.1	126.0
0	Relleno	20.0		
5	40	19.0	1.0	120.6
10	50	18.5	0.4	27.0
10	60	16.6	2.0	117.0
10	70	14.7	1.9	111.6
10	80	12.8	1.9	114.3
15	95	10.2	2.6	105.0
0	Relleno	20.0		
15	110	17.4	2.6	104.4
15	125	14.8	2.6	103.2

15	140	12.4	2.4	97.8
0	Relleno	20.0		
15	155	17.6	2.4	97.2
15	170	15.2	2.3	93.0
Promedio (Últimas 3 mediciones)				96.0

Anexo 4. Datos resultantes del balance hídrico de suelos

Apompuá

Año	HSfmay	HSfjun	HSfjul	HSfago	HSfsep	HSfoct	HSfnov
1984	20.89	7.73	3.89	71.31	74.93	42.59	12.46
1985	5.77	22.68	13.44	2.05	21.83	74.93	74.93
1986	53.61	22.21	19.73	3.18	19.84	23.39	20.06
1987	0.00	3.33	22.87	15.18	61.57	21.72	6.70
1990	12.39	11.90	17.45	16.60	14.39	31.68	74.93
1991	60.79	46.78	21.99	28.67	27.64	8.40	30.69
1992	0.00	0.00	38.36	9.71	60.08	22.36	24.47
1993	74.93	74.93	3.43	34.36	74.93	74.93	13.80
1994	16.10	43.76	23.32	1.63	57.84	54.12	68.70
1995	27.03	70.61	13.77	74.93	74.93	74.93	22.10
1996	56.17	4.65	59.18	74.93	68.87	74.93	74.93
1997	31.18	74.93	61.57	5.29	3.52	26.84	41.88
1998	15.80	0.00	28.65	46.62	66.59	74.93	58.42
1999	16.16	30.90	17.08	3.22	74.93	74.93	14.83
2000	10.75	23.15	0.00	38.11	74.93	53.20	14.14
2001	74.93	50.55	0.00	36.91	35.74	25.92	13.90
2002	46.23	74.93	45.48	13.93	26.29	21.18	19.94
2003	19.90	74.93	22.62	34.63	43.15	67.39	38.19
2004	0.00	37.55	38.36	18.51	52.22	11.00	18.73
2005	43.32	74.93	74.93	74.93	74.93	74.93	14.83
2006	0.00	24.87	9.94	36.03	41.40	37.05	62.70
2007	21.58	0.62	25.62	70.44	74.93	74.93	47.21
2008	74.93	74.93	74.93	74.93	74.93	74.93	11.34
2009	26.28	68.30	28.18	32.65	16.96	19.61	52.92
2010	74.93	74.93	74.93	74.93	74.93	50.29	18.21
2011	56.32	60.10	74.93	61.36	74.93	74.93	7.16
2012	74.93	59.20	9.28	17.86	12.82	12.74	8.27

Aranjuez

Año	HSfmay	HSfjun	HSfjul	HSfago	HSfsep	HSfoct	HSfnov
1978	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86

1980	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86
1981	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86	52.46
1982	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86
1983	22.85	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86
1984	6.47	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86	48.74
1985	14.78	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86
1986	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86
1987	14.50	62.86	62.86	62.86	62.86	62.86	18.61

Zapote

Año	HSfmay	HSfjun	HSfjul	HSfago	HSfsep	HSfoct	HSfnov
1971	10.37	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	70.72
1972	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25
1973	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25
1974	64.36	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	39.86
1978	21.20	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	69.78
1980	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25
1982	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	75.60	35.65
1983	12.13	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	75.30
1984	0.13	61.12	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25
1985	47.97	80.25	80.25	65.94	80.25	80.25	80.25
1986	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	69.13
1987	0.00	14.03	80.25	80.25	80.25	52.60	38.27
1988	0.00	80.25	80.25	80.25	80.25	80.25	32.31

Guayacán

Año	HSfmay	HSfjun	HSfjul	HSfago	HSfsep	HSfoct	HSfnov
1991	17.15	27.42	5.72	20.82	15.00	23.84	13.35
1993	71.97	71.97	26.41	23.44	71.97	71.97	4.38
1994	10.14	3.37	32.07	0.00	56.98	71.97	69.34
1995	5.07	71.97	69.31	71.97	71.97	71.97	36.59
1996	71.97	33.38	21.06	52.29	71.97	71.97	71.97
1997	30.36	71.97	43.09	0.00	71.97	71.97	65.61
1998	71.97	55.89	35.95	48.82	71.97	71.97	63.96
1999	16.29	19.96	14.90	67.55	71.97	68.01	6.86
2000	27.10	15.90	0.00	7.90	71.97	71.97	20.78
2001	67.38	35.91	35.29	37.09	18.43	21.53	19.03
2002	71.97	71.97	44.87	5.98	35.78	21.53	22.57
2003	18.02	71.97	10.12	22.12	34.85	0.76	12.24
2004	9.65	14.09	22.85	12.77	35.18	26.26	16.63

2005	46.80	71.97	71.97	71.97	71.97	71.97	40.59
2006	0.00	28.20	31.65	33.31	22.46	34.76	12.91
2007	17.19	11.70	7.16	71.97	71.97	71.97	43.23
2008	37.73	15.88	18.29	0.00	25.67	17.35	41.73
2009	13.30	15.37	0.62	35.52	3.18	14.88	56.22
2010	71.97	71.97	71.97	71.97	71.97	71.97	4.94
2011	15.54	3.04	1.00	2.06	12.97	49.54	67.08

Jucuapa

Año	HSfmay	HSfjun	HSfjul	HSfago	HSfsep	HSfoct	HSfnov
1971	62.65	93.80	93.80	93.80	93.80	93.80	78.29
1972	93.80	93.80	87.55	74.79	41.74	49.99	86.25
1973	35.77	93.80	93.80	93.80	93.80	93.80	73.72
1974	15.61	34.89	42.49	74.17	93.80	93.80	39.82
1978	93.80	93.80	93.80	93.80	93.80	93.80	73.09
1981	93.80	93.80	93.80	93.80	93.80	93.80	70.92
1982	93.80	93.80	93.80	64.82	93.80	69.62	79.69
1983	28.81	93.80	93.80	93.80	93.80	47.21	93.80
1984	31.18	44.74	74.57	93.80	93.80	87.48	35.90
1985	35.79	54.33	93.80	90.93	93.80	93.80	93.80
1986	93.80	82.27	93.80	93.80	93.80	73.94	58.35
1987	39.80	39.62	93.80	93.80	93.80	84.72	35.02
1988	93.80	93.80	93.80	93.80	93.80	93.80	93.80

Anexo 5. Funciones de distribuciones utilizadas en el Análisis Regional de Frecuencia

Distribución Normal Generalizada (GNO)

$$F(x) = Phi(y)$$

Dónde, Phi: Función de distribución de normal estándar detallada en la siguiente ecuación:

$$Phi = \frac{1}{alpha\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_i)^2}{2alpha^2}}$$

y: Función que depende de los parámetros x_i : Parámetro de Localización (Media),

alpha: Escala (Desviación estándar) y k: Forma (asimetría).

$$y = \left(\frac{-1}{k}\right) \log\left(\frac{1 - k(x - x_i)}{\text{alpha}}\right)$$

Distribución Pearson tipo III (PE3)

$$f(x) = \frac{(x - \varepsilon)^{\alpha-1} e^{-\frac{(x-\varepsilon)}{\beta}}}{\beta \Gamma(\alpha)}$$

Dónde, α : Término que determina la forma de la función, dado por la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{4}{\gamma^2}$$

Debe cumplirse que:

$$\gamma \neq 0$$

β : Término que determina la escala de la función, se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{1}{2} \sigma |\gamma|$$

ε : Término que determina la localización de la función, a través de la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \mu - \frac{2\sigma}{\gamma}$$

Dónde:

μ : Media, σ : Desviación estándar, γ : Asimetría, y Γ es la función Gamma. La función Gamma está definida por la siguiente expresión:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt$$

Anexo 6. Script para implementación en R

Análisis Regional de Frecuencia a través de L-Momentos

Script para llevar a cabo el análisis regional de frecuencia usando L-Momentos

Script base por: Nuñez, J. 2011. RSARFLM v.1. Regional Frequency Analysis L-moments R script. Water Center for Arid and Semiarid Zones of Latina America and the Caribbean.CAZALAC.La Serena,Chile

Referencias: Nuñez,J., Verbist,K., Wallis,J., Schaefer,M., Morales,L. and Cornelis,W. 2011.Regional frequency analysis for mapping drought events in north-central Chile.Journal of hydrology. 405 (3-4), pg. 352-366

Referencias: UNESCO. 2010. Guía Metodológica para la Aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de Sequías basado en L-Momentos y Resultados de Aplicación en América Latina. Documento Técnico PHI-LAC N° 27.

Modificado por: Augustí Forguet, Universidad Politécnica de Cataluña. 12/2013.

Modificado por: Bonilla Escoto. Estudiante de la Maestría en Ciencias del Agua, con énfasis en Calidad de Agua (CIRA - UNAN Managua). 07/2014.

BLOQUE 1: PREPARACIÓN DEL SISTEMA

#-----

install.packages("lmom")# Original de Hosking

install.packages("lmomRFA") # Segundo paquete de Hosking

install.packages("nsRFA") # Alberto Viglione

install.packages("raster") # Trabajar con imágenes ráster, para etapa de mapeo

install.packages("rgdal")# Formatos de archivos

install.packages("sp") # Paquete para objetos espaciales

install.packages("DEoptim") # Paquete para minimización ajuste curvas

install.packages("sqldf")# Paquete para manipulación de Base de Datos

```
install.packages("tcltk")# Paquete para seleccionar carpeta de trabajo
install.packages("car") # Gráfico de cociente de L-momentos en 3D
install.packages("ggplot2") # Gráficos
```

```
#####
```

```
#rm(list=ls(all=TRUE))
```

```
setwd("dirección de carpeta")
```

```
library(lmom)
```

```
library(lmomRFA)
```

```
library(nsRFA)
```

```
library(raster)
```

```
library(rgdal)
```

```
library(DEoptim)
```

```
library(sqldf)
```

```
library(tcltk)
```

```
library(geoR)
```

```
library(rgl)
```

```
library(car)
```

```
library(ggplot2)
```

```
#####
```

```
#WF<-tk_choose.dir(getwd(), "Dirección de carpeta")
```

```
#setwd(WF)
```

```

#setwd("Dirección de carpeta")

#####

#-----

# BLOQUE 2: ESTRUCTURACIÓN DE LA BASE DE DATOS

#-----

#####

BaseDatosNNNRegistros<-read.csv("Dirección de la
carpeta/BaseDatosRegistros.csv", sep=",", dec=".", na.strings="NA")

BaseDatosNNNRegistros <-BaseDatosNNNRegistros[,c(1:14)]

BaseDatosNNNEstaciones<- read.csv("Dirección de la
carpeta/BaseDatosEstaciones.csv", sep=",", dec=".",na.strings="NA")

#BaseDatosNNNEstaciones <- BaseDatosNNNEstaciones[1:22,]

BaseDatosNNNEstaciones <- BaseDatosNNNEstaciones[1:19,]

#####

EstacionesOriginales<-as.factor(BaseDatosNNNRegistros[[1]])

NumeroEstacionesOriginales<-nlevels(EstacionesOriginales)# Cada estación es 1
nivel

PPNNN<-na.omit(BaseDatosNNNRegistros)# Me quedo solamente con registros
completos.

EstacionesCompletas<-as.factor(PPNNN[[1]])

NumeroEstacionesCompletas<-nlevels(EstacionesCompletas)

for(i in c(3:14)){PPNNN[[i]]<-as.numeric(PPNNN[[i]])}

LluviaAnual<-PPNNN[3:14] # Cálculo la lluvia anual. Pero podría usar otra variable

```

y cambiar las columnas.

```
L<-length(PPNNN[[1]]) # Obtengo el valor de longitud total de registros
```

```
SumaLluviaAnual<-matrix(rowSums(LluviaAnual),nrow=L,ncol=1)
```

```
# Base intermedia
```

```
BaseDatosNNNIntermedia<-cbind(PPNNN,SumaLluviaAnual)# Uno las columnas  
con los Índices calculados para cada registro
```

```
par(mfrow=c(1,2))
```

```
# Esta calcula la PMA medio por estación. Sin datos ausentes.
```

```
PMA_por_Estacion<-
```

```
as.matrix(tapply(BaseDatosNNNIntermedia[[15]],BaseDatosNNNIntermedia[[1]],me  
an,na.rm=T))
```

```
hist(PMA_por_Estacion,main="Histograma de Precipitación",xlab="Precipitación  
Media Anual (mm/año)", ylab="Frecuencia", xlim=c(500, 2000), col="gray",  
border="white")
```

```
# Visualización de resultados para detectar fallas de cálculo de MAP
```

```
# Esta calcula la Longitud de Registro media por estación. Sin datos ausentes.
```

```
LR_por_Estacion<-
```

```
as.matrix(tapply(BaseDatosNNNIntermedia[[15]],BaseDatosNNNIntermedia[[1]],len  
gth))
```

```
hist(LR_por_Estacion, main="Histograma de Longitud de Registro",xlab="Longitud  
de registro por Estación", ylab="Frecuencia", xlim=c(10, 60), col="gray",
```

```

border="white")# Visualización de resultados para detectar fallas de cálculo de RL
par(mfrow=c(1,1))

#row.names(BaseDatosNNNEstaciones)<-
as.character(BaseDatosNNNEstaciones[c(1:22),1])

row.names(BaseDatosNNNEstaciones)<-
as.character(BaseDatosNNNEstaciones[c(1:19),1])

Alt_por_Estacion<-BaseDatosNNNEstaciones[7]

id.estacion<-levels(EstacionesCompletas)# Identifico las estaciones a utilizar

BaseDatosIndices<-
cbind(id.estacion,PMA_por_Estacion,LR_por_Estacion,Alt_por_Estacion)# Unos
los valores calculados para cada estación

colnames(BaseDatosIndices)[1]<-'id.estacion' # Asigno los nombres de las nuevas
columnas calculadas

colnames(BaseDatosIndices)[2]<-'PMA' # Asigno los nombres de las nuevas
columnas calculadas

colnames(BaseDatosIndices)[3]<-'LR' # Asigno los nombres de las nuevas
columnas calculadas

colnames(BaseDatosIndices)[4]<-'Alt' # Asigno los nombres de las nuevas
columnas calculadas

BaseConsolidadaNNN<-
merge(BaseDatosNNNEstaciones,BaseDatosIndices,by.x="id.estacion",by.y="id.es
tacion") # Ac? uno las dos bases de datos a nivel de estaciones solamente.

BaseConsolidadaNNN_sin_NA<-na.omit(BaseConsolidadaNNN) # Elimino todas
las estaciones con datos ausentes.

```

```
#####

#Para crear una sola gran Base de Datos

BaseCompletaNNN<-
merge(BaseConsolidadaNNN_sin_NA,BaseDatosNNNIntermedia, by.x =
"id.estacion", by.y = "id.estacion") # Acá uno la Base de Datos de Estaciones con
Índices Medios y la Base de Datos de Registros

View(BaseCompletaNNN)

#write.csv(BaseCompletaNNN, file =
"BaseCompletaNNN.csv",row.names=FALSE)

#write.csv(BaseCompletaNNN, file = "BaseCompletaNic.csv",row.names=FALSE)

#####

#-----
-----

# BLOQUE 3: CREACIÓN DE LAS REGIONES HOMOGÉNEAS "A PRIORI"

#-----
-----

#####

#BaseCompletaNNN <- read.csv("BaseCompletaNNN.csv")# Y vuelvo a cargar la
Base de Datos

#BaseCompletaNNN <- read.csv("BaseCompletaNic.csv")# Y vuelvo a cargar la
Base de Datos

#####

# Filtrado
```

```

BaseCompletaSelect<-sqldf('select * from BaseCompletaNNN where LR > 12')
BaseCompletaNicaragua_dat<-BaseCompletaSelect["SumaLluviaAnual"][,]
BaseCompletaNicaragua_fac<-factor(BaseCompletaSelect["id.estacion"][,])
BaseCompletaNicaragua<-
split(BaseCompletaNicaragua_dat,BaseCompletaNicaragua_fac)
BaseCompletaNicaragua
Baseregionescompletas<-list(BaseCompletaNicaragua)
Baseregionescompletas
summary(BaseCompletaNicaragua)
Completo<-length(Baseregionescompletas)
Completo
#
z<-1
for (z in 1:Completo) {
  #par(mfrow=c(1,2))
  #Los comandos que siguen a continuación permiten calcular todo el
  procedimiento paso a paso
  # Este primer comando calcula los L-momentos para las variables que van en las
  columnas designadas en Dataset[primera: última]
  # En caso de que se tengan más o menos, cambiar los valores.
  SummaryStatistics<-regsamlmu (Baseregionescompletas[[z]])
  SummaryStatistics}
# El siguiente comando solamente convierte la salida anterior en un formato que
  puede ser leído por el comando siguiente.
  SummaryStatisticsRegData<-as.regdata(SummaryStatistics)

```

```
SummaryStatisticsRegData
```

```
Rlmoments<-regavlmom(SummaryStatisticsRegData)
```

```
Rlmoments
```

```
# El siguiente comando calcula los estadísticos regionales, como el test de  
homogeneidad, las medidas de bondad de ajuste para varias distribuciones
```

```
ARF<-regtst(SummaryStatisticsRegData, nsim=1000)
```

```
ARF
```

```
a<-length(Baseregionescompletas[[z]])}
```

```
ResultadosARFD<-ARF$D # Se almacenan las medidas de discordancia
```

```
ResultadosARFH<-ARF$H # Se almacenan las medidas de homogeneidad
```

```
ResultadosARFZ<-ARF$Z # Se almacenan las medidas de bondad de ajuste
```

```
ARFtabla<-data.frame(SummaryStatistics$name,ARF$D)
```

```
# Gráfico Cociente L-momentos
```

```
par(mfrow=c(1,2),pty="s")
```

```
plot(SummaryStatisticsRegData$t_3, SummaryStatisticsRegData$t,
```

```
  xlab=expression(paste("L-asimetría, ", italic(t[3]))),
```

```
  ylab=expression(paste("L-CV, ", italic(t))), cex.lab=0.9,
```

```
  cex.axis=0.8, col="red", pch=19, cex=1.4)
```

```
points(mean(SummaryStatisticsRegData$t_3),mean(SummaryStatisticsRegData$t  
) ,pch=3, cex=2, lwd=1.5)
```

```
identify(SummaryStatisticsRegData$t_3,SummaryStatisticsRegData$t,labels=Sum  
maryStatisticsRegData$name,cex=0.9)
```

```
plot(SummaryStatisticsRegData$t_3, SummaryStatisticsRegData$t_4,
```

```

xlab=expression(paste("L-asimetría, ", italic(t[3])),
ylab=expression(paste("L-kurtosis, ", italic(t[4])),
cex.lab=0.9, cex.axis=0.8, col="blue", pch=19, cex=1.4)

points(mean(SummaryStatisticsRegData$t_3),mean(SummaryStatisticsRegData$t
_4),pch=3, cex=2, lwd=1.5)

identify(SummaryStatisticsRegData$t_3,SummaryStatisticsRegData$t_4,labels=S
ummaryStatisticsRegData$name,cex=0.9)

par(mfrow=c(1,1))

# Gráfico cociente L-momentos 3D

plot3d(SummaryStatisticsRegData$t_3, SummaryStatisticsRegData$,
SummaryStatisticsRegData$t_4, main="Filtrado de estaciones", xlab="L-
asimetria", ylab="L-CV", zlab="L-Kurtosis",
lwd=1.5, type="s", col='green', size=2)

#identify3d(SummaryStatisticsRegData$t_3, SummaryStatisticsRegData$,
SummaryStatisticsRegData$t_4, labels=SummaryStatistics$name)

# Base Definitiva para ARF

BaseDefinitivaSelect<-sqldf('select * from BaseCompletaNNN where "id.estacion"
!= "San_Dionisio"')

BaseCompletaDefinitiva_dat<-BaseDefinitivaSelect["SumaLluviaAnual"][,]

BaseDefinitivaNicaragua_fac<-factor(BaseDefinitivaSelect["id.estacion"][,])

BaseDefinitivaNicaragua<-
split(BaseCompletaDefinitiva_dat,BaseDefinitivaNicaragua_fac)

BaseDefinitivaNicaragua

BaseregionesDefinitiva<-list(BaseDefinitivaNicaragua)

```

```

BaseregionesDefinitiva
summary(BaseDefinitivaNicaragua)
Definitiva<-length(BaseregionesDefinitiva)
#
h<-1
for (h in 1:Definitiva) {
#par(mfrow=c(1,2))
#Los comandos que siguen a continuacion permiten calcular todo el procedimiento
paso a paso
# Este primer comando calcula los l-momentos para las variables que van en las
columnas designadas en Dataset[primera:última]
# En caso de que se tengan más o menos, cambiar los valores.
SummaryStatistics1<-regsamlmu (BaseregionesDefinitiva[[h]])
SummaryStatistics1}
# El siguiente comando solamente convierte la salida anterior en un formato que
puede ser leído por el comando siguiente.
SummaryStatisticsRegData1<-as.regdata(SummaryStatistics1)
SummaryStatisticsRegData1
Rlmoments1<-regavlmom(SummaryStatisticsRegData1)
Rlmoments1
# El siguiente comando calcula los estadísticos regionales, como el test de
homogeneidad, las medidas de bondad de ajuste para varias distribuciones
ARF1<-regtst(SummaryStatisticsRegData1, nsim=1000)}
ARF1
ResultadosARFD1<-ARF1$D # Se almacenan las medidas de discordancia

```

```

ResultadosARFH1<-ARF1$H # Se almacenan las medidas de homogeneidad
ResultadosARFZ1<-ARF1$Z # Se almacenan las medidas de bondad de ajuste
ARFtablaDef<-data.frame(SummaryStatistics1$name,ARF1$D)

# Gráfico Cociente L-momentos Definitiva
par(mfrow=c(1,2),pty="s")
plot(SummaryStatisticsRegData1$t_3, SummaryStatisticsRegData1$t,
      xlab=expression(paste("L-asimetría, ", italic(t[3]))),
      ylab=expression(paste("L-CV, ", italic(t))), cex.lab=0.9,
      cex.axis=0.8, col="red", pch=19, cex=1.4)
points(mean(SummaryStatisticsRegData1$t_3),mean(SummaryStatisticsRegData1
$t),pch=3, cex=2, lwd=1.5)
identify(SummaryStatisticsRegData1$t_3,SummaryStatisticsRegData1$t,labels=S
ummaryStatisticsRegData1$name,cex=0.9)

plot(SummaryStatisticsRegData1$t_3, SummaryStatisticsRegData1$t_4,
      xlab=expression(paste("L-asimetría, ", italic(t[3]))),
      ylab=expression(paste("L-kurtosis, ", italic(t[4]))),
      cex.lab=0.9, cex.axis=0.8, col="blue", pch=19, cex=1.4)
points(mean(SummaryStatisticsRegData1$t_3),mean(SummaryStatisticsRegData1
$t_4),pch=3, cex=2, lwd=1.5)
identify(SummaryStatisticsRegData1$t_3,SummaryStatisticsRegData1$t_4,labels=
SummaryStatisticsRegData1$name,cex=0.9)

par(mfrow=c(1,1))

```

```

# Cociente L-momentos 3D

# Cociente L-momentos 3D Definitivo

# Clúster

par(mfrow=c(1,1))

clongitud<-tapply(BaseDefinitivaSelect$Long,      BaseDefinitivaSelect$id.estacion,
mean)

cPMA<-tapply(BaseDefinitivaSelect$SumaLluviaAnual,
BaseDefinitivaSelect$id.estacion, mean, na.rm=T)

caltitud<-tapply(BaseDefinitivaSelect$Altitud,      BaseDefinitivaSelect$id.estacion,
mean, na.rm=T)

cluster<-data.frame(longitud=clongitud, PMA=cPMA, altitud=caltitud)

cluster_final<-cluster[-15,]

dendograma<-dist(cluster_final)

dendograma

clusterward<-hclust(dendograma, "ward.D")

clusterward

plot(clusterward, main="Dendograma", xlab="Estaciones", ylab="Altura")

# Regiones

RegionValle<-sqldf("select * from BaseDefinitivaSelect where PMA<=1100")

RegionValle_dat<-RegionValle["SumaLluviaAnual"][,]

RegionValle_fac<-factor(RegionValle["id.estacion"][,])

RegValle<-split(RegionValle_dat,RegionValle_fac)

RegValle

```

```

RegionCentro<-sqldf("select * from BaseDefinitivaSelect where PMA between
1100 and 1800 and Altitud <= 1200")

RegionCentro_dat<-RegionCentro["SumaLluviaAnual"][,]
RegionCentro_fac<-factor(RegionCentro["id.estacion"][,])
RegCentro<-split(RegionCentro_dat,RegionCentro_fac)

RegCentro

# Valle

SummaryStatistics2<-regsamlmu (RegValle)

SummaryStatistics2

# El siguiente comando solamente convierte la salida anterior en un formato que
puede ser leído por el comando siguiente.

SummaryStatisticsRegData2<-as.regdata(SummaryStatistics2)

SummaryStatisticsRegData2

Rlmoments2<-regavlmom(SummaryStatisticsRegData2)

# El siguiente comando calcula los estadísticos regionales, como el test de
homogeneidad, las medidas de bondad de ajuste para varias distribuciones

ARF2<-regtst(SummaryStatisticsRegData2, nsim=1000)

ARF2

# Centro

SummaryStatistics3<-regsamlmu (RegCentro)

SummaryStatistics3

# El siguiente comando solamente convierte la salida anterior en un formato que
puede ser leído por el comando siguiente.

```

```
SummaryStatisticsRegData3<-as.regdata(SummaryStatistics3)
```

```
SummaryStatisticsRegData3
```

```
RIImoments3<-regavImom(SummaryStatisticsRegData3)
```

```
# El siguiente comando calcula los estadísticos regionales, como el test de  
homogeneidad, las medidas de bondad de ajuste para varias distribuciones
```

```
ARF3<-regtst(SummaryStatisticsRegData3, nsim=1000)
```

```
ARF3
```

```
# Dado a q no se pudo establecer las regiones con los parámetros se procede a  
mover regiones y vectorizar
```

```
Aguas_zarcas<-BaseCompletaNNN[1:35,24]
```

```
Aranjuez<-BaseCompletaNNN[36:66,24]
```

```
Cacao_suarez<-BaseCompletaNNN[67:82,24]
```

```
Corneta<-BaseCompletaNNN[83:101,24]
```

```
Dario<-BaseCompletaNNN[102:136,24]
```

```
Esquipulas<-BaseCompletaNNN[137:169,24]
```

```
Labranza<-BaseCompletaNNN[170:193,24]
```

```
Lastenia<-BaseCompletaNNN[194:206,24]
```

```
Majada<-BaseCompletaNNN[207:231,24]
```

```
Mascota<-BaseCompletaNNN[232:257,24]
```

```
Muy_muy<-BaseCompletaNNN[258:294,24]
```

```
Quebrada_onda<-BaseCompletaNNN[295:315,24]
```

```
Raul<-BaseCompletaNNN[316:342,24]
```

```
Reyna<-BaseCompletaNNN[343:363,24]
```

```

Tierra_azul<-BaseCompletaNNN[495:516,24]
San_Ramon<-BaseCompletaNNN[387:418,24]
Sebaco<-BaseCompletaNNN[419:472,24]
Terrabona<-BaseCompletaNNN[473:494,24]

# Regiones con arreglo
# Región del Centro
Centro<-list(Reyna, San_Ramon, Cacao_suarez, Esquipulas, Labranza, Lastenia)
C<-regsamlmu(Centro,nmom=5)
C
Casregdata<-as.regdata(C)
RlmomentsCentro<-regavlmom(Casregdata)
RlmomentsCentro
HC<-regtst(C, nsim=1000)
HC
Resultados_D_HC<-HC$D # Se almacenan las medidas de discordancia
Resultados_D_HC
Resultados_H_HC<-HC$H # Se almacenan las medidas de homogeneidad
Resultados_H_HC
TablaCentro<-data.frame(c("Reyna", "San Ramón", "Cacao de los Suárez",
"Esquipulas", "Labranza", "Santa Lastenia"),HC$D)

# Gráfico L-Momentos
lmsd(x=C$t_3, y=C$t_4,distributions="GLO GEV GPA GNO PE3", xlab="L-
asimetría", ylab="L-Kurtosis", main="Región Centro",twopar=F, pch=16, lwd=2,

```

```
xlim=c(0, 0.45), xlegend=c(0,0.2), ylegend=c(0.35,0.40))
points(mean(C$t_3),mean(C$t_4),pch=3,cex=2, lwd=1.5)
grid(lty=2, lwd=1.5)
```

```
# Región del Valle
```

```
Valle<-list(Corneta, Quebrada_onda, Aguas_zarcas, Terrabona, Majada, Dario,
Raul, Sebaco)
```

```
V<-regsamlmu(Valle,nmom=5)
```

```
V
```

```
Vasregdata<-as.regdata(V)
```

```
RlmomentsValle<-regavlmom(Vasregdata)
```

```
RlmomentsValle
```

```
HV<-regtst(V, nsim=1000)
```

```
HV
```

```
TablaValle<-data.frame(c("Corneta", "Quebrada Onda", "Aguas Zarcas",
"Terrabona", "Majada", "Darío", "Raúl González", "Sébaco"),HV$D)
```

```
# Gráfico L-Momentos
```

```
lmrd(x=V$t_3, y=V$t_4, distributions="GLO GEV GPA GNO PE3", xlab="L-
asimetría", ylab="L-Kurtosis", main="Región Valle",twopar=F, pch=16, lwd=2,
xlim=c(0, 0.45), xlegend=c(0,0.2), ylegend=c(0.35,0.40))
```

```
points(mean(V$t_3),mean(V$t_4),pch=3,cex=2, lwd=1.5)
```

```
grid(lty=2, lwd=1.5)
```

```
#####
```

```
#-----  
-----
```

```
# BLOQUE 4: ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIAS
```

```
#-----  
-----
```

```
#####
```

```
# Centro
```

```
ACentro<-regfit(C,"gno") # Acá se selecciona Logística Generalizad (GNO).  
Modificar según el modelo de mejor ajuste
```

```
ACentro
```

```
# Valle
```

```
AValle<-regfit(V, "pe3") # Aca se selecciona Pearson III (pe3). Modificar según el  
modelo de mejor ajuste
```

```
AValle
```

```
# El siguiente comando, calcula los cuantiles regionales para distintas  
probabilidades acumuladas
```

```
# Centro
```

```
RegionalQuantilesCentro<-regquant(seq(0.05, 0.95, by=0.05), ACentro)
```

```
RegionalQuantilesCentro
```

```
# Valle
```

```
RegionalQuantilesValle<-regquant(seq(0.05, 0.95, by=0.05), AValle)
```

```
RegionalQuantilesValle
```

```
# Las siguientes tres líneas de comandos generan una gráfica de cuantiles
```

```

# Centro
rgcCentro<- regqfunc(ACentro) # Calcular Regional Growth Curve
QCentro<-rgcCentro(seq(0.05, 0.95, by=0.05))
curve(rgcCentro, 0.01, 0.99, xlab="Probabilidad de no excedencia, (F)",
ylab="Curva de crecimiento", main="Región Centro",col="blueviolet", lwd=2)
grid(lty=2, lwd=1.5)

```

```

# Valle
rgcValle<- regqfunc(AValle) # Calcular Regional Growth Curve
QValle<-rgcValle(seq(0.05, 0.95, by=0.05))
curve(rgcValle, 0.01, 0.99, xlab="Probabilidad de no excedencia, (F)", ylab="Curva
de crecimiento", main="Región Valle", col="blueviolet", lwd=2)
grid(lty=2, lwd=1.5)

```

```

# Centro
ResultadosrfitdistC<-ACentro$dist # Se identifica la distribución utilizada
ResultadosrfitparaC<-ACentro$para # Se presentan los parámetros de la
distribución ajustada
ResultadosRegionalQuantilesC<-RegionalQuantilesCentro # Para cada región "z",
almaceno sus resultados
ResultadosRMAPC<-weighted.mean(Casregdata[[3]],Casregdata[[2]]) # Se calcula
la precipitación media cada Región

```

```

# Valle
ResultadosrfitdistV<-AValle$dist # Se identifica la distribución utilizada
ResultadosrfitparaV<-AValle$para # Se presentan los parámetros de la
distribución ajustada

```

```
ResultadosRegionalQuantilesV<-RegionalQuantilesValle # Para cada región "z",  
almaceno sus resultados
```

```
ResultadosRMAPC<-weighted.mean(Vasregdata[[3]],Vasregdata[[2]]) # Se calcula  
la precipitación media cada Región
```

```
#-----  
-----
```

```
# BLOQUE 5: FUNCIÓN DE AJUSTE DE CURVA L-MOMENTOS VS  
PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL
```

```
#-----  
-----
```

```
#####
```

```
ResultadosRImoments<-SummaryStatistics1
```

```
RLCV <- ResultadosRImoments[,4]
```

```
RLSkewness<-ResultadosRImoments[,5]
```

```
RLKurtosis<-ResultadosRImoments[,6]
```

```
RMAP<-ResultadosRImoments[,3]
```

```
MAPvsLCV <- data.frame(RMAP,RLCV)
```

```
MAPvsLSkewness<- data.frame(RMAP,RLSkewness)
```

```
MAPvsLKurtosis<- data.frame(RMAP,RLKurtosis)
```

```
LSkewnessvsLKurtosis <- data.frame(RLSkewness,RLKurtosis)
```

```
#####
```

```
# PASO 12: AJUSTE MEDIANTE ALTERNATIVAS DE OPTIMIZACIÓN
```

```

# .....
# OPCIÓN AJUSTE 1: Minimización mediante DEoptim. UTILIZAR ESTE
MÉTODO

#####

PMediaAnual<-RMAP

LCVOBS<-RLCV

LCVEST1<-function(p)  p[1]*exp(p[2]*PMediaAnual)+p[3]  # Exponencial
Decreciente

LCVEST2<-function(p) p[1]+p[2]*log(PMediaAnual) # Logarítmica

LCVEST3<-function(p)  p[1]*(PMediaAnual)^2+p[2]*PMediaAnual+p[3]  #
Cuadrática

fun1<-function(p) sum((LCVOBS-LCVEST1(p))^2)

fun2<-function(p) sum((LCVOBS-LCVEST2(p))^2)

fun3<-function(p) sum((LCVOBS-LCVEST3(p))^2)

ss1  <-  DEoptim(fun1,  lower=c(0,-0.1,0),  upper=c(0.3,0,0.2),
control=list(trace=FALSE))

ss2  <-  DEoptim(fun2,  lower=c(0,-0.1,0),  upper=c(0.3,0,0.2),
control=list(trace=FALSE))

ss3  <-  DEoptim(fun3,  lower=c(0,-0.1,0),  upper=c(0.3,0,0.2),
control=list(trace=FALSE))

paLCV1 <- ss1$optim$bestmem
paLCV2 <- ss2$optim$bestmem
paLCV3 <- ss3$optim$bestmem

paLCV1
paLCV2
paLCV3

```

```

LSkOBS<-RLSkewness

LSkEST1<-function(p)  p[1]*exp(p[2]*PMediaAnual)+p[3]  # Exponencial
Decreciente

LSkEST2<-function(p) p[1]+p[2]*log(PMediaAnual) # Logarítmica

LSkEST3<-function(p) p[1]*(PMediaAnual)^2+p[2]*PMediaAnual+p[3] # Cuadrática

fun1<-function(p) sum((LSkOBS-LSkEST1(p))^2)

fun2<-function(p) sum((LSkOBS-LSkEST2(p))^2)

fun3<-function(p) sum((LSkOBS-LSkEST3(p))^2)

ss1      <-      DEoptim(fun1,      lower=c(0,-0.1,0),      upper=c(0.3,0,0.2),
control=list(trace=FALSE))

ss2      <-      DEoptim(fun2,      lower=c(0,-0.1,0),      upper=c(0.3,0,0.2),
control=list(trace=FALSE))

ss3      <-      DEoptim(fun3,      lower=c(0,-0.1,0),      upper=c(0.3,0,0.2),
control=list(trace=FALSE))

paLSk1 <- ss1$optim$bestmem

paLSk2 <- ss2$optim$bestmem

paLSk3 <- ss3$optim$bestmem

paLSk1

paLSk2

paLSk3

LKurtOBS<-RLKurtosis

LKurtEST1<-function(p)  p[1]*exp(p[2]*PMediaAnual)+p[3]  # Exponencial
decreciente

```

```

LKurtEST2<-function(p) p[1]+p[2]*log(PMediaAnual) # Logarítmica
LKurtEST3<-function(p) p[1]*(PMediaAnual)^2+p[2]*PMediaAnual+p[3] #
Cuadrática

fun1<-function(p) sum((LKurtOBS-LKurtEST1(p))^2)
fun2<-function(p) sum((LKurtOBS-LKurtEST2(p))^2)
fun3<-function(p) sum((LKurtOBS-LKurtEST3(p))^2)

ss1 <- DEoptim(fun1, lower=c(0,-0.1,0), upper=c(0.3,0,0.2),
control=list(trace=FALSE))
ss2 <- DEoptim(fun2, lower=c(0,-0.1,0), upper=c(0.3,0,0.2),
control=list(trace=FALSE))
ss3 <- DEoptim(fun3, lower=c(0,-0.1,0), upper=c(0.3,0,0.2),
control=list(trace=FALSE))

paLKurt1 <- ss1$optim$bestmem
paLKurt2 <- ss2$optim$bestmem
paLKurt3 <- ss3$optim$bestmem

paLKurt1
paLKurt2
paLKurt3

#.....

# OPCIÓN AJUSTE 2: Optimización mediante comando NLS (Non-linear Squares)
nlsfitLCV1 <- nls(RLCV~A*exp(B*RMAP)+C,data=MAPvsLCV,
start=list(A=paLCV1[1], B=paLCV1[2], C=paLCV1[3])) # Exponencial Decreciente
nlsfitLCV2 <- nls(RLCV~A+B*log(RMAP),data=MAPvsLCV,
start=list(A=paLCV2[1], B=paLCV2[2], C=paLCV2[3])) # Logarítmica

```

```
nlsfitLCV3 <- nls(RLCV~(A*(RMAP)^2)+B*RMAP+C,data=MAPvsLCV,
start=list(A=paLCV3[1], B=paLCV3[2], C=paLCV3[3])) # Cuadrática
```

```
#nlsfitLSkewness <-
nls(RLSkewness~A*exp(B*RMAP)+C,data=MAPvsLSkewness,
start=list(A=paLSk[1], B=paLSk[2], C=paLSk[3]))
```

```
#nlsfitLKurtosis <- nls(RLKurtosis~A*exp(B*RMAP)+C,data=MAPvsLKurtosis,
start=list(A=paLKurt[1], B=paLKurt[2], C=paLKurt[3]))
```

```
pp<-seq(min(RMAP),max(RMAP),length=100)
```

```
plot(RMAP, RLCV, xlim=c(min(RMAP),max(RMAP)),
ylim=c(min(RLCV),max(RLCV)), col="blue", cex=1.2, pch=16, xlab="Precipitación
Media Anual", ylab="LCV")
```

```
lines(pp,predict(nlsfitLCV1,list(RMAP=pp)), lwd=1.7, col="blue")
```

```
lines(pp,predict(nlsfitLCV2,list(RMAP=pp)), lwd=1.7, col="orange")
```

```
lines(pp,predict(nlsfitLCV3,list(RMAP=pp)), lwd=1.7, col="red")
```

```
legend("bottomleft",title="Leyenda",legend=c("Exponencial
decreciente","Cuadrática"),col=c("blue", "red"), lty=c(1,1), lwd=c(1.7,1.7))
```

```
grid(lty=2, lwd=1.5)
```

```
CoefDet1<-
```

```
#-----
-----
```

```
# BLOQUE 6: GENERACIÓN MAPA FRECUENCIAS Y PROBABILIDAD
(PERÍODO DE RETORNO)
```

```
#-----
-----
```

```
MapaNNN<-readGDAL("Dirección de la carpeta/Kriging.tif") # Defino archivo de
mapa base
```

```

r<-raster(MapaNNN)

# Boxplot mensual
boxplot(BaseDatosNNNRegistros[,3:14], ylab="Precipitación Mensual (mm)",
col="mediumpurple1", par(las=2))

plot(BaseCompletaNNN$SumaLluviaAnual~BaseCompletaNNN$id.estacion,
xlab=NULL, ylab="Precipitación Media Anual (mm)",col="mediumpurple1",
cex.axis=0.7, par(las=2), mar=c(1,1,1,1));#par(new = TRUE)

LCVmap<-paLCV1[1]*exp(paLCV1[2]*r)+paLCV1[3] # Creo mapa de L-CV usando
coeficientes de mejor ajuste

LSmap<-paLSk1[1]*exp(paLSk1[2]*r)+paLSk1[3] # Creo mapa de L-skewness
usando coeficientes de mejor ajuste

LKmap<-paLKurt1[1]*exp(paLKurt1[2]*r)+paLKurt1[3] # Creo mapa de L-kurtosis
usando coeficientes de mejor ajuste

R<-as.matrix(r) # ESTE CORRESPONDE AL MAPA DE VARIABLE FÍSICA
ESPECÍFICO. SOLO SE USARÍA PARA CALCULO DE CUANTILES, NO DE
PROBABILIDADES

J<-as.matrix(LCVmap)

K<-as.matrix(LSmap)

L<-as.matrix(LKmap)

Cuantil<-0.85 # Como se está analizando la precipitación anual, en este caso es
0.85 de la PMA.

FreqMap<-F.gamma (Cuantil*(R/R), Pearson3$xi, Pearson3$beta, Pearson3$alfa)
# Mapa de Probabilidad formato Matriz

ReturnMap<-(1/FreqMap)# Mapa de Periodo de Retorno formato Matriz

```

```
MapaFrecuencia<-raster(FreqMap)
```

```
MapaPeriodoRetorno<-raster(ReturnMap)
```

```
projection(MapaFrecuencia) <- "+proj=latlong +ellps=WGS84" # Cambio  
proyección cartográfica
```

```
xmin(MapaFrecuencia)<-xmin(r) ; xmax(MapaFrecuencia)<-xmax(r) ;
```

```
ymin(MapaFrecuencia)<-ymin(r) ; ymax(MapaFrecuencia)<-ymax(r) ;
```

```
projection(MapaPeriodoRetorno) <- "+proj=latlong +ellps=WGS84" # Cambio  
proyección cartográfica
```

```
xmin(MapaPeriodoRetorno)<-xmin(r);xmax(MapaPeriodoRetorno)<-xmax(r);
```

```
ymin(MapaPeriodoRetorno)<-ymin(r);ymax(MapaPeriodoRetorno)<-ymax(r);
```

```
# Exportación de mapas
```

```
# Cada mapa se elabora modificando el cuantil, de acuerdo al tipo de mapa de  
período que se necesita
```

```
writeRaster(MapaFrecuencia,filename="MapaFrecuencia.tif",format="GTiff",overwri  
te=TRUE,NAflag=-999) # Mapa de frecuencias para una reducción del 45 %  
respecto a la media
```

```
writeRaster(MapaPeriodoRetorno,filename="MapaPeriodoRetorno.tif",format="GTif  
f", overwrite=TRUE,NAflag=-999) # Mapa de período de retorno para una  
reducción del 45 % respecto a la media
```

```
writeRaster(MapaFrecuencia,filename="MapaFrecuencia1.tif",format="GTiff",overw  
rite=TRUE,NAflag=-999) # Mapa de frecuencias para una reducción del 30 %  
respecto a la media
```

```
writeRaster(MapaPeriodoRetorno,filename="MapaPeriodoRetorno1.tif",format="GT  
iff", overwrite=TRUE,NAflag=-999) # Mapa de período de retorno para una  
reducción del 30 % respecto a la media
```

```
writeRaster(MapaFrecuencia,filename="MapaFrecuencia2.tif",format="GTiff",overw  
rite=TRUE,NAflag=-999) # Mapa de frecuencias para una reducción del 15 %  
respecto a la media
```

```
writeRaster(MapaPeriodoRetorno,filename="MapaPeriodoRetorno2.tif",format="GT  
iff", overwrite=TRUE,NAflag=-999) # Mapa de período de retorno para una  
reducción del 15 % respecto a la media
```

Interpolación tipo Kriging Ordinario (KO)

```
# Interpolación tipo Kriging Ordinario (KO)
```

```
# Autor: Bonilla (2015)
```

```
# Paquetes estadísticos a utilizar
```

```
library(rgdal)
```

```
library(gstat)
```

```
library(raster)
```

```
library(fBasics)
```

```
library(nortest)
```

```
# Elegir directorio y cargar datos
```

```
setwd("Dirección de la carpeta de trabajo")
```

```
data<-read.table("clipboard",header=T) # O utilizar "Import Dataset"
```

```
# Ver estructura de datos
```

```
str(data)
```

```

# Permite tener tanto un objeto tipo data.frame como SpatialPointsDataFrame
data1<-data

# Asignar coordenadas
coordinates(data1)=~X+Y

str(data1) # El objeto data ha sido transformado de data.frame a
SpatialPointsDataFrame

# Asignar sistema de coordenadas de referencia
#proj4string(data1)=CRS("+init=epsg:32616")

# Estadística básica
estb<-basicStats(data$PMA, ci=0.95); estb
ks.test(data$PMA, 'pnorm', mean=mean(data$PMA), sd=sd(data$PMA))
lillie.test(data$PMA) # Determinar normalidad de los datos
shapiro.test(data$PMA)
jarqueberaTest(data$PMA)
par(mfrow=c(1,3))
boxplot(data$PMA, ylab="Precipitación Media Anual (mm/año)",
col="lightskyblue2")
qqnorm(data$PMA, xlab="Cuantiles teóricos", ylab="Cuantiles de la muestra",
pch=16)
qqline(data$PMA, col="red",lwd=2)
hist(data$PMA, xlab="Precipitación Media Anual (mm/año)", ylab="Frecuencia",
col="gray", border="white", main="Histograma")

```

```

par(mfrow=c(1,1))

# Diagrama de Dispersión (Coordenadas vs Variable). Ver supuesto de
Estacionariedad
par(mfrow=c(1,2))
plot(data$X, data$PMA,xlab="Coordenadas Este", ylab="Precipitación Media
Anual (mm/año)",pch=16)
grid(col="gray", lty=2)
plot(data$Y, data$PMA,xlab="Coordenadas Norte", ylab="Precipitación Media
Anual (mm/año)",pch=16)
grid(col="gray", lty=2)
par(mfrow=c(1,1))

# Correlación de las coordenadas con la variable en estudio
cor(data$X,data$PMA)
cor(data$Y,data$PMA)

# Semivariograma
v <- variogram(data$PMA~1, data1,alpha=c(0,45,90,135)); v
plot(v, xlab="Distancia", ylab="Semivarianza", pch=16, col="blue", cex=1.2)
Dir0<-subset.data.frame(v,dir.hor==0,select=c(dist,gamma));Dir0
Dir45<-subset.data.frame(v,dir.hor==45,select=c(dist,gamma));Dir45
Dir90<-subset.data.frame(v,dir.hor==90,select=c(dist,gamma));Dir90
Dir135<-subset.data.frame(v,dir.hor==135,select=c(dist,gamma));Dir135
plot(Dir0$dist,Dir0$gamma,type="b",pch=16,xlab="Distancia (m)",

```

```

ylab="Semivarianza",xlim=c(min(v$dist),max(v$dist)),ylim=c(min(v$gamma),max(v
$gamma)))
lines(Dir45$dist,Dir45$gamma,type="b",pch=16, col="red")
lines(Dir90$dist,Dir90$gamma,type="b",pch=16, col="blue")
lines(Dir135$dist,Dir135$gamma,type="b",pch=16, col="cyan")
grid(col="gray",lty=2)
legend("topleft",title="Leyenda",legend=c("Dir 0°","Dir 45°","Dir 90°","Dir
135°"),col=c("black","red","blue","cyan"),lty=c(1,1,1,1),pch=c(16,16,16,16),cex=0.8)
v.fit <- fit.variogram(object = v, vgm(model = c("Sph", "Gau", "Exp","Mat")));v.fit
plot(v, pl = T, model = v.fit, xlab="Distancia", ylab="Semivarianza", pch=16,
cex=1.2, col="blue", main="Ajuste a modelo teórico del Variograma")

```

```
# Crear una grid base
```

```
rescell <- 30 # Resolución de la capa
```

```
x.range <- as.integer(range(data1$X))
```

```
y.range <- as.integer(range(data1$Y))
```

```
grid.map=expand.grid(x=seq(from=x.range[1], to=x.range[2], length.out =
(x.range[2] - x.range[1])/rescell),
```

```

y=seq(from=y.range[1], to=y.range[2], length.out= (y.range[2] -
y.range[1])/rescell))

```

```
plot(grid.map)
```

```
gridded(grid.map)=~x+y
```

```
# Kriging
```

```
Kriging<-krige(formula = PMA ~ 1, data1,grid.map, model=v.fit);Kriging
```

```

plot(Kriging)
proj4string(Kriging)=CRS("+init=epsg:32616")

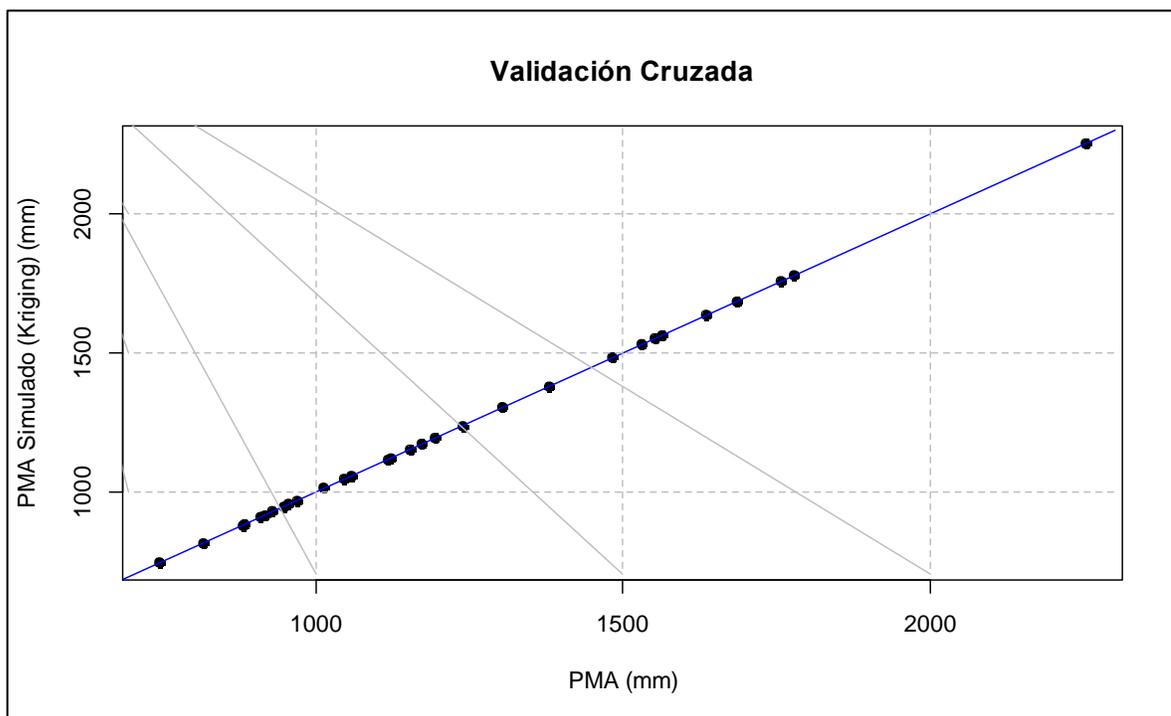
# Validación cruzada del Kriging
cross1<-krige.cv(PMA~1,data1,model=v.fit); cross1

# Bondad de ajuste de la validación cruzada
RSQR<-as.numeric(cor.test(data1$PMA,cross1$var1.pred)$estimate)^2; RSQR #
Coeficiente de determinación de Pearson (R2)
RMSD<-sqrt(sum((cross1$residual)^2)/length(data1$PMA)); RMSD # Raíz
del error cuadrático medio

# Exportando a formato Geotiff
writeGDAL(Kriging[1],"Dirección de la carpeta destino/Kriging.tif" , setStatistics=T)
contour(Kriging)

```

Anexo 7. Validación cruzada de la interpolación de las precipitaciones medias anuales por el método de Kriging Ordinario (KO)



Anexo 8. Obras

8.1 Tanque de ferrocemento

A continuación, se describe brevemente los pasos a seguir para la ejecución de un tanque cualquiera. La información fue tomada y modificada del documento de **Hidalgo, P. Sindoni, M. Brito, J. Martínez, F. Navarro, M. y Medina, Y. 2008.** Tanque artesanal tipo australiano: Una alternativa para el riego de cultivos hortofrutícolas en las zonas rurales. Venezuela: Centro de Investigaciones Agrícolas del estado de Anzoátegui (INIA).

El sitio escogido para el tanque debe ser limpiado de vegetación, suelo suelto y rocas donde se podría perforar la base del tanque. Para los tanques más pequeños (hasta 10m³) habitualmente solo es necesario limpiar el sitio y disponer una capa de unos 15 cm de arena y grava una vez todas las conducciones y tubos han sido dispuestos. Para los tanques más grandes es necesario un anillo de cimentación separado para soportar las paredes. Este se prepara mediante la excavación de una zanja justo debajo de la línea de pared y rellenándola con hormigón.

Arena, grava y agua debería obtenerse antes de la construcción de un tanque, de esta manera los usuarios del tanque pueden colaborar en gran parte de su ejecución y reducir por tanto los costos. El árido se puede almacenar en montones al lado de la bandeja de mezcla para el mortero: Una región de unos 2x2 m, con una capa hormigón extendida sobre otra de grava, acabada con un borde sobresaliendo ligeramente para prevenir el vertido accidental de pasta de cemento durante la mezcla.

Para tanques pequeños aislados, es más barato traerse directamente la tabla de mezclas como parte del equipo necesario, pues mezclar el mortero directamente sobre la superficie del suelo contaminaría el mortero y lo debilitaría, hay que evitarlo.

Los montones de árido deben mantenerse limpios de polvo y otros materiales. Habitualmente se cubren con un plástico o sacos para protegerlos de contaminación por animales o polvo arrastrado por el viento. Hay que asegurarse

que se dispone de suficiente arena para cada tanque antes de que se empiece a construir. El cemento y la arena deben mantenerse cubiertos durante su almacenamiento. Hay que reunir y revisar que todo el equipo y herramientas estén a punto para su utilización. Cualquier tubo o conducto debe instalarse antes de extender el hormigón.

La superficie del sitio donde va a ir el tanque hay que repasarla antes, quitar cantos que puedan posteriormente ocasionar problemas o trabajo innecesario.

Los cimientos para pequeños tanques construidos "*in situ*" suelen consistir en una losa de hormigón de unos 7,5 cm de espesor y unos 2,8 m de diámetro. El hormigón se prepara con una mezcla de 1:2:4 (cemento: arena: grava en volumen) y se deja endurecer durante una semana.

En ocasiones se suelen disponer ladrillos en círculo que actúan como molde para la base. Primero se vierte el hormigón, luego se procede al armado de ésta colocando una malla electrosoldada o malla de gallinero en el hormigón fresco. Finalmente se vuelve a aplicar otra capa hasta cubrir la armadura por completo.

La zanja anular de los grandes tanques se rellena con hormigón después de haber ejecutado la losa de cimentación y se deja también endurecer. En el caso que se requieran también vigas debajo de las juntas de la losa (depósitos de más de 10m de diámetro) éstas se van a ejecutar al mismo tiempo.

Para la colocación del encofrado hay que examinar en el encofrado posibles daños, limpiarlo y engrasarlo para evitar que el hormigón se pegue. Para este propósito se puede incluso utilizar aceite de coche usado. A continuación, se coloca el encofrado y se ata con los pernos.

Las láminas empleadas no necesariamente han de ser lisas, es también habitual el uso de láminas corrugadas que de hecho dan más pegue para el mortero.

La Fijación de la armadura: la malla retorcida se envuelve entorno del encofrado y se ata firmemente.

Para los tanques pequeños, la malla se pasa por debajo del encofrado, para introducirse en la losa de cimentación.

En los tanques más grandes se puede fijar la malla en la zanja de cimentación de las paredes, que posteriormente se rellenará con hormigón. En éstos incluso es mejor sustituir la malla por barras de refuerzo de unos 6 mm de diámetro, verticales espaciadas cada 10 cm. Los alambres longitudinales de unos 4 mm de diámetro se envuelven a continuación en torno del tanque a lo largo de toda la altura de pared.

Cualquier unión entre alambres debe tener al menos un solapamiento de $\frac{1}{2}$ metro, hay que atarse con alambre fino, una vez para cada alambre (nunca atar todos los alambres de la unión a la vez). Asimismo, si se notan flojos los alambres longitudinales se pueden tensar mediante una llave especial.

Una vez ejecutada la base, se levanta sobre ésta una malla electrosoldada en forma de cilindro, clavándola en la losa de base de hormigón todavía fresco

A continuación, se procede (como en el caso de utilizar como molde planchas de acero) a la disposición de las mallas de alambre también atadas a la electromalla.

En total hay que disponer 3 tubos:

- ✓ Tubo para el grifo, 15 cm por encima de la base.
- ✓ Tubo de entrada, en la parte más alta de la pared.
- ✓ Rebosadero, justo debajo del tubo de entrada.

Por lo general, se colocan antes todos los tubos y conducciones que el extendido del mortero por la pared, si bien a edades tempranas el mortero todavía está lo suficiente “verde” como para cortarlo manualmente.

La arena y el cemento se colocan en la bandeja de mezcla o bien en la caja de medida en una proporción de 3:1 en volumen si es posible. Es difícil juzgar estos volúmenes a paladas: es necesaria una caja de medida. La caja, con unas medidas de 50x50x40 cm llena de arena y mezclada con una bolsa de 50 kg de cemento da lugar a una mezcla 3:1 de arena/cemento en volumen.

El cemento y la arena se mezclan a mano en seco en la bandeja de mezcla (si no se dispone de una mezcladora) en varios montones hasta que estén bien

mezclados. A continuación, se hace un agujero en el centro del montón y se vierte el agua en él, unos 25 litros para cada cantidad medida con la caja. Se mezcla todo hasta lograr una buena consistencia y una mezcla homogénea, sin grumos. De hecho, es mejor inicialmente verter algo menos de agua e ir añadiendo después si resulta difícil hacer una mezcla húmeda con el cemento y la arena.

Después de la mezcla el mortero debe ser aplicado rápidamente en el tanque, si transcurre más de ½ hora, éste deberá ser utilizado para la losa de cimentación o habrá que tirarlo pues el cemento pierde rápidamente la trabajabilidad si no se añade gran cantidad de agua. En ambientes calurosos, hay que cubrir la mezcla con un saco húmedo o un plástico negro para prevenir el secado rápido.

El mortero se aplica a mano en las paredes del tanque con la ayuda de planchas para el extendido en capas no mayores de 1 cm. Las capas demasiado gruesas no funcionan bien y tienden a desprenderse. El mortero recién preparado se vierte en una tabla de 75x75 cm aproximadamente que evita que el mortero se mezcle con polvo u otros contaminantes. Además, se recoge el mortero que cae de las paredes durante el extendido. El mortero se recoge de la tabla mediante las planchas para el extendido: con un panel de 30x30. Se sostiene el mortero y se extiende con una plancha.

Se extiende el mortero desde la base de la pared hasta arriba en finas capas, justo cubriendo el alambre de refuerzo. Las paredes se construyen de esta manera, en secciones verticales entorno del tanque. Asimismo, la tabla se va moviendo para cada sección.

Cuando la primera capa de mortero ha endurecido lo suficiente, hay que rascar la superficie, para lograr darle una mínima textura rugosa a la cual pueda pegarse la siguiente capa de mortero. Es importante por eso, que no haya acabado de endurecer completamente. La siguiente capa será exterior y se le debe dar una textura lisa para lograr una buena superficie de pared.

El siguiente día se extrae el encofrado del interior del tanque y se aplica una capa de mortero en el interior. En caso de que las planchas de encofrado sean corrugadas, entonces se rellenarán las corrugas de la pared con esta capa y

cualquier alambre de refuerzo que quede al descubierto.

En caso de que el tanque deba quedar durante la noche con una capa inacabada, entonces hay que cortar el borde del mortero, al día siguiente rascarlo con un cepillo de púas y aplicarle una capa de cemento para darle un buen pegue al aplicar el mortero fresco. Es aconsejable, sin embargo, completar las capas en cada jornada. Si se prevé una interrupción en el trabajo entonces es mejor completar la sección en torno al tanque, generándose así una junta horizontal. En cualquier caso, hay que evitar siempre la formación de juntas verticales, son las más desfavorables para el trabajo del tanque y que presentan una mayor tendencia a abrirse.

Aplicar el mortero en el tanque puede parecer difícil al principio, pero en pocas horas cualquiera puede cogerle el truco sin dificultad. La idea está en aplicar el mortero bien mezclado rápida y firmemente con la plancha y darle una textura suficientemente fina. La superficie final no es lo más importante, pues si queda rugosa se puede rellenar posteriormente. Lo más importante es lograr un espesor uniforme a lo largo de la pared sin agujeros ni puntos débiles.

Después de haber aplicado el mortero a las paredes del tanque, debe cubrirse con un plástico negro o sacos húmedos. Si el mortero recién colocado queda expuesto directamente al sol o al viento, va a perder rápidamente el agua debido a la retracción ya comentada, con lo cual su resistencia final y durabilidad se verán considerablemente reducidas. En el peor de los casos se puede llegar a producir la rotura del tanque.

En ambientes muy calurosos el tanque debe cubrirse entre las sucesivas aplicaciones de capa y capa. En condiciones más suaves el tanque se deja abierto hasta haberse aplicado la última capa y luego se cubre durante una semana o más para el curado. El mortero tardará al menos un mes en alcanzar una resistencia próxima a su resistencia final y durante los primeros días estará lo suficiente “manipulable” como para cortarlo a mano para la colocación de cualquier tubo u otro elemento.

El curado es absolutamente esencial para lograr tanques fuertes y es uno de los

pasos más importantes de su construcción. Es, además, una de las cosas más difíciles de asegurar en el campo.

El mortero de cemento retraerá más, cuanto más se seque. Este efecto será pues mayor en ambientes calurosos y secos. Si después el tanque se llena de agua rápidamente el mortero no tiene tiempo para volver a expandir pues la absorción de humedad es más lenta y el refuerzo de alambre no contribuirá en soportar las tensiones de las paredes. En este caso, hay un alto riesgo de que se produzca la fisuración o hasta el fallo de la estructura. Un tanque vacío, especialmente uno recién construido debe ser llenado siempre lentamente, y debería además dejarse durante una semana o más con un poco de agua antes de llenarse.

Un tanque de las características como el aquí descrito debería tener una vida útil de unos 20 a 30 años.

8.2 Reservorios de ladera

La siguiente información fue tomada de **Bendaña, G. 2012**.

Como su nombre lo indica, el reservorio es una tecnología para laderas. Consiste en una estructura de almacenamiento de agua, que se construye semienterrada en el suelo. Prácticamente se trata de una pila semienterrada, en forma de una panela o tapa de dulce, que es más pequeña del fondo y más ancha y larga en la parte superficial dando la forma de un trapecio. El reservorio está diseñado de forma que puede ser abastecido de agua a través de manguera, captar el agua directo de la lluvia o por esorrentía por medio de acequias.

8.3 Represas pequeñas aprovechando cárcavas

La siguiente información fue tomada de **Cajina, M. 2006**.

Se trata de pequeños almacenadores de aguas de lluvia, construidos utilizando la forma natural que toman las cárcavas durante su proceso erosivo. Se construyen con un dique de tierra o piedra. Para esto se desea que los suelos sean

impermeables. Si los suelos son muy permeables que facilitan la rápida infiltración, estos pueden impermeabilizarse, con material local. Se suavizan los taludes y se establece una cubierta vegetal para controlar la erosión. En sus alrededores deben plantarse árboles de sombra para disminuir los porcentajes de evaporación. Los tamaños están en dependencia del potencial de precipitación, característicos del área de captación y de la demanda de agua.

8.4 Zanjas de almacenamiento revestidas

La siguiente información fue tomada de **Bendaña, G. 2012**.

Consiste en excavaciones realizadas en curvas a nivel con profundidades no mayor a un metro (1 m) y con paredes en forma de talud, con ángulo de inclinación de 40% con respecto al fondo, con el fin de mejorar la estabilidad del suelo, principalmente en suelos arcillosos. La longitud varía según las necesidades de almacenamiento y tomando en consideración la estabilidad de los suelos. En las partes centrales de la longitud se dejan áreas de descargue con un filtro artesanal adherido a una manguera de polietileno para facilitar la salida de agua por gravedad hacia el área de aprovechamiento. Una vez construidas las zanjas se recubren con plástico preferiblemente de calibre 1000. Las zanjas de almacenamiento pueden taparse con el mismo material plástico o dependiendo del uso final, puede hacerse con material vegetal, lo que ayudaría a disminuir la pérdida de agua por evaporación.

Anexo 9. Fotos



Foto 1. Manantial Jucuapa Arriba, Matagalpa



Foto 2. Medición de Pozos en la Comunidad El Zapote, San Dionisio



Foto 3. Prueba de Infiltración realizada en Guayacán, Matagalpa



Foto 4. Prueba de tacto, muestra Aranjuez, Matagalpa