

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN AL
DESARROLLO DE CONDICIONES DE SEQUÍA EN LA REGIÓN
CHOROTEGA

Tesis sometido a la consideración de la Comisión del
Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera
para optar al grado y título de Maestría Académica en Hidrología

MELISSA RÍOS SOLANO

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2021

Dedicatoria

A mis padres, Dunia Solano Moreno y Juan Carlos Ríos Garro, por apoyarme durante todos estos años de estudio. A mi directora de tesis quien, a pesar de los inconvenientes y todo el tiempo que involucró la investigación, me siguió apoyando para concluir este trabajo.

Agradecimientos

A Dios, que sin él nada nos es posible.

A mis padres, Dunia Solano Moreno y Juan Carlos Ríos Garro por su apoyo incondicional en esta etapa.

Al comité asesor de tesis, Dra. Ana María Durán-Quesada por haberme involucrado en uno de sus proyectos, la guía y todo el apoyo y aprendizaje profesional recibido durante el desarrollo de la investigación. Al Dr. Christian Birkel por su guía y aporte en el mejoramiento de la calidad de los resultados y al Dr. Hugo Hidalgo por sus aportes en el proceso de revisión del trabajo desarrollado.

A los proyectos B7507 “Efectos del cambio climático observado sobre el ciclo hidrológico y la disponibilidad de recurso hídrico en la región Chorotega” y B9519 “Stable isotopes to monitor variability and changes within the earth climate system” y al Instituto Meteorológico Nacional por facilitar la información meteorológica utilizada en esta investigación. A la Dirección de Agua por brindar la información de caudal y al Dr. Ricardo Sánchez de UNA-SIL por facilitar la información isotópica utilizada.

“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Hidrología”

Dr. Eric Alfaro Martínez
**Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado**

Dra. Ana María Durán-Quesada
Profesora Guía

Dr. Hugo Hidalgo León
Lector

Dr. Christian Birkel Dostal
Lector

Dr. Rodrigo Castillo Rodríguez
Director del Programa de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera

Lic. Melissa Ríos Solano
Sustentante

Índice

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Hoja de aprobación.....	iv
Índice	v
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	xiii
Motivación.....	1
Hipótesis	2
Objetivos.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
1. Introducción	4
2. Datos y métodos	18
1.1. Datos	18
2.1.1 Registro de estaciones meteorológicas.....	19
2.1.2 Índice Multivariado de El Niño.....	20
2.1.3 Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés)	20
2.1.4 Humedad del suelo.....	21
2.1.5 Coberturas	22
1.2. Métodos.....	22
2.2.1 Caracterización climatológica	22
2.2.2 Estimación de evapotranspiración.....	22
2.2.3 Aridez.....	23

2.2.4 Cálculo de índices para análisis de sequía	24
2.2.5 Modelo de partición de la transpiración.....	25
2.2.6 Proyección de eventos secos con base a escenarios RCP4.5 y RCP8.5	28
3. Caracterización climatológica de la región Chorotega	29
3.1. Precipitación.	29
3.2. Temperatura.	30
3.3. Evapotranspiración.	32
3.3.1 Comparación de los métodos de estimación de ET	32
3.3.2 Evapotranspiración en la región Chorotega.....	35
4. Eventos de sequía en el período observacional histórico	37
4.1. Sesgos en el conteo de eventos secos asociados con el método de estimación de ET	37
4.2. Identificación de eventos secos con SPEI.....	39
4.3. Condiciones de aridez.....	41
4.4. Relación entre el comportamiento de las condiciones secas y la vegetación.	44
5. Impacto de los modos de variabilidad interanual sobre los eventos secos	46
5.1. ENOS	46
5.2. PDO.....	48
6. Evaluación de la intensificación de la sequía y modelo de partición	51
6.1. Evaluación de la intensificación de la sequía	51
6.2. Calibración del modelo de partición	52
6.3. Influencia del ENOS sobre el comportamiento de la transpiración.....	56
7. Proyecciones.	58
8. Conclusiones y recomendaciones.	66
Referencias	69

ANEXOS	82
ANEXO 1. Datos meteorológicos.....	82
ANEXO 2. Presupuesto	83
ANEXO 3. Modelo de partición simple	84
ANEXO 4. SPEI-12 de acuerdo a ecuación de ET.....	90
ANEXO 5. Comparación salidas modelo acoplado para datos in-situ vs proyecciones ..	91

Índice de figuras

Figura 1. Zonas de vida presentes en región Chorotega según la clasificación de Holdridge (1974). Se muestra una predominancia del bosque húmedo premontano transición a basal y del bosque húmedo tropical.....	5
Figura 2. Densidad de población por distritos para la región Chorotega de acuerdo al Censo del 2016. La región Chorotega presenta la densidad de población más baja del país; en términos distritales los valores más altos de población se presentan en Liberia, Palmira y Cañas.	8
Figura 3. Esquema representativo de las categorías de sequía y su desarrollo. De arriba hacia abajo muestra la evolución de una sequía meteorológica hacia una agrícola e hidrológica debido a alteraciones en la precipitación y temperatura y las diferentes afectaciones hacia los componentes del sistema hidrológico.	11
Figura 4. Esquema de retroalimentación atmósfera- superficie durante el desarrollo de las sequías. La reducción en las lluvias, que provoca estrés hídrico y disminución en la humedad del suelo por el cual se reduce el contenido de vapor de agua para ser evaporado por la atmósfera y por ende aumento en el déficit de presión de vapor, puede ser a su vez potenciado por los demás factores antes mencionados.	15
Figura 5. Distribución de las estaciones meteorológicas utilizadas, con información de las variables climatológicas disponibles (precipitación, temperatura o ambas) para la región Chorotega.....	19
Figura 6. Diagrama esquemático del modelo de partición de la transpiración.	26
Figura 7. a) Precipitación acumulada promedio anual y b) Ciclo anual de la precipitación, para el período 1999 – 2019, basado en los datos observados de cada una de las estaciones meteorológicas. La distribución espacial no presenta un patrón particular, el comportamiento es de tipo bimodal, el MSD provoca un descenso en la lluvia a mediados de la temporada lluviosa.	29
Figura 8. a) Temperatura media promedio y b) Ciclo anual de la temperatura media, para el período 1999 – 2019, basado en los datos observados de cada una de las estaciones meteorológicas. La distribución espacial se asocia con la elevación, los valores más altos se presentan durante la temporada seca. c) Rango diurno de temperatura promedio y d) Ciclo anual del rango diurno de temperatura, para el período 1999 – 2019, basado en los registros	

observados de cada una de las estaciones meteorológicas. La distribución espacial es similar al de la temperatura media, las máximas variaciones en temperatura entre el día y la noche se presentan durante la temporada seca y se asocian a la baja nubosidad. 31

Figura 9. Comparación entre los promedios acumulados de ET_0 según las ecuaciones de Hargreaves (línea negra) y Penman-Monteith (línea roja) en las estaciones de: a) Finca La Ceiba, b) Aeropuerto Liberia, c) Santa Cruz y d) Hacienda Mojica. En todos los casos, la ecuación de Hargreaves sobreestima la ET_0 en relación con la ecuación de Penman-Monteith, esto debido a la omisión o sustitución de los valores de radiación con parámetros relacionados a la latitud. 33

Figura 10. a) ET_0 acumulada promedio anual sobre la región Chorotega y b) Ciclo anual de la ET_0 , para el período 1999 – 2019, basado en los datos observados de cada una de las estaciones meteorológicas, de acuerdo a la ecuación de Penman-Monteith. La estación con los acumulados más altos se localiza en el sector de Liberia, se ve refleja la diferencia entre la temporada lluviosa (valores más bajos) y la seca (valores más altos) en relación con el ingreso de radiación y la nubosidad. 35

Figura 11. Conteo de eventos de sequía meteorológica (izquierda) basada en el SPI, y sequía agrícola basadas en el SPEI con datos de ET_0 estimada con la ecuación de Hargreaves (centro) y de Penman-Monteith (derecha) de 1998 al 2019. Se denota un comportamiento similar a la sequía meteorológica y sin diferencia entre las estaciones cuando se cuentan los eventos de sequía agrícola basados en la ET_0 de Hargreaves, de base energética..... 37

Figura 12. Eventos secos, de acuerdo a las anomalías de precipitación (barras) y el SPEI 12 (línea negra), para las estaciones de: a) Finca La Ceiba, Nicoya, b) Aeropuerto, Liberia, c) Santa Cruz y d) Hacienda Mojica, Bagaces. Se reconoce que la segunda mitad del período presenta los eventos de mayor magnitud y duración en todas las estaciones. 39

Figura 13. Total de ondas tropicales por año de acuerdo a los boletines meteorológicos mensuales emitidos desde el 2005..... 41

Figura 14. Aridez anual estimada como relación de la precipitación entre la ET_0 según Hargreaves en: a) Finca La Ceiba, Nicoya; b) Aeropuerto, Liberia; c) Santa Cruz; y d) Hacienda Mojica, Bagaces. 42

Figura 15. Diagrama de Taylor representativo de la correlación entre el NDVI (MODIS-TERRA) y el SPEI en diferentes escalas para las estaciones de: a) Finca La Ceiba, Nicoya; b) Aeropuerto, Liberia; c) Santa Cruz; y d) Hacienda Mojica, Bagaces.	44
Figura 16. Correlación mensual entre las anomalías estandarizadas de precipitación y el Índice Multivariado del ENOS (MEI) por estación según la fórmula de Spearman. Todas las correlaciones obtenidas son de baja o moderada significancia, exceptuando la correlación en agosto en Hacienda Mojica, Bagaces. Y en su gran mayoría son de signo negativa, a excepción de los meses de marzo, abril y una estación en julio.	47
Figura 17. Correlación mensual entre las anomalías estandarizadas de precipitación y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) por estación, según la fórmula de Spearman. Todas las correlaciones obtenidas son de baja significancia, pero durante marzo y junio son de signo positivo, mientras que en agosto, septiembre y diciembre son correlaciones negativas.	49
Figura 18. Gráfico representativo de la correlación durante los meses de agosto entre las anomalías de precipitación (barras) y los índices del MEI (línea roja), y del PDO (línea azul punteada) para las estaciones de: a) Cañas; b) Hacienda Mojica, Bagaces; c) Ingenio Taboga, Cañas; y d) Finca Las Huacas, Liberia.	50
Figura 19. Diagrama de las características de la propagación de la sequía meteorológica hacia la sequía hidrológica.	52
Figura 20. a) Caudal medio mensual simulado (línea café) y observado (puntos) para la estación La Guardia, Liberia. b) Relación entre los caudales observados y simulados. El modelo reproduce muy bien el comportamiento del río especialmente los valores bajos de caudal, le cuesta reproducir valores de caudal sobre los 200 mm.	53
Figura 21. Climatología anual de las variables relacionadas con ETP estimadas con el modelo acoplado con LAI para la estación aeropuerto, Liberia. Con excepción de la transpiración, en todas las variables relacionadas con la ETP la mayor variabilidad ocurre durante los meses lluviosos.	54
Figura 22. Distribución anual de las variables relacionadas con la Ea para la estación aeropuerto, Liberia. Hay poca variación en los estimados de intercepción y evaporación a pesar de la variabilidad interanual.	55

Figura 23. Anomalías de transpiración (línea color rosa) y NDVI (línea color verde) para la estación aeropuerto, Liberia. Los valores más altos de NDVI se relacionan con anomalías de transpiración negativas y a la inversa.	56
Figura 24. Diagrama de Taylor representativo de la correlación mensual entre las anomalías de transpiración y el MEI en la estación Aeropuerto, Liberia. La influencia del ENOS es de mayor significancia durante junio, julio y agosto	57
Figura 25. Comportamiento de la temperatura media anual según las proyecciones RCP4.5 (arriba) y RCP8.5(abajo) para distintos períodos. Los aumentos de temperatura más importantes se darían sobre el sector costero sur y la península de Nicoya.	59
Figura 26. Comportamiento de la temperatura máxima anual según las proyecciones RCP4.5 (arriba) y RCP8.5(abajo) para distintos períodos. Se presenta una intensificación y extensión del área con las temperaturas máximas más altas, hasta cubrir gran parte de la región Chorotega.	60
Figura 27. Comportamiento de la precipitación media anual según las proyecciones RCP4.5 (arriba) y RCP8.5(abajo) para distintos períodos. El secado más intenso y preocupante de la región se localiza sobre la cuenca Tempisque-Bebedero.	61
Figura 28. Valores proyectados del SPI-12 para Nicoya (arriba) y Liberia (abajo) según los escenarios RCP4.5 (izquierda) y RCP8.5 (derecha). Un comportamiento similar de variabilidad en las condiciones de sequía meteorológica entre las dos estaciones se presenta bajo el escenario RCP4.5; al contrario, en el escenario RCP8.5 se presentan diferencias entre estaciones y las condiciones secas se vuelven más severas.	62
Figura 29. Valores proyectados del SPEI-12 para Nicoya (arriba) y Liberia (abajo) según los escenarios RCP4.5 (izquierda) y RCP8.5 (derecha). Se presentan las mismas condiciones estimadas por el SPI-12 con ligeras diferencias en la intensidad del índice de sequía.	63
Figura 30. Acumulados mensuales de las variables relacionadas con ETP estimadas con el modelo hidrológico y los datos de los escenarios RCP4.5 (azul) y RCP8.5 (rojo) para la estación aeropuerto, Liberia, desde 1998 hasta el 2099. Se percibe una tendencia hacia la disminución en la precipitación neta y en la intercepción, y una tendencia hacia el aumento en evaporación y la transpiración, lo cual sigue un aumento en la demanda atmosférica y menor disponibilidad hídrica para sustentar las necesidades del medio.	64

Figura 31. Modelo hidrológico conceptual.	84
Figura 32. Caudal medio mensual observado (línea roja) y simulado (línea azul), con el modelo de partición simple, para la estación La Guardia, Liberia. Se observa un comportamiento similar, entre las series de caudal, pero, los valores simulados no reproducen los picos más altos registrados.....	85
Figura 33. Climatología anual de las variables relacionadas con ET_0 estimadas con el modelo de partición simple para la estación aeropuerto, Liberia. Con excepción de la transpiración, en todas las variables relacionadas con la ET_0 la mayor variabilidad ocurre durante los meses lluviosos.	86
Figura 34. Distribución anual de las variables relacionadas con la ET_0 para la estación aeropuerto, Liberia.....	87
Figura 35. Anomalías de transpiración (línea color rosa) y NDVI (línea color verde) para la estación aeropuerto, Liberia.	88
Figura 36. Diagrama de Taylor representativo de la correlación mensual entre las anomalías de transpiración y el MEI en la estación Aeropuerto, Liberia. La influencia del ENOS es de mayor significancia durante agosto y septiembre.	89

Índice de tablas

Tabla 1. Distribución de las personas ocupadas por rama de actividad	9
Tabla 2. Métodos indirectos para la estimación de la evapotranspiración	17
Tabla 3. Variables utilizadas en la investigación.....	18
Tabla 4. Categorías de SPI.....	25
Tabla 5. Parámetros y reservorios del modelo de partición.....	27
Tabla 6. Déficit promedio mensual	40
Tabla 7. Correlación entre las anomalías de aridez y el NDVI	43
Tabla 8. Correlación entre las anomalías de precipitación y el MEI.....	46
Tabla 9. Correlación entre las anomalías de precipitación y el PDO	48



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Melissa Ríos Solano, con cédula de identidad 1 - 1475 0062, en mi condición de autor del TFG titulado "Análisis de la respuesta de la evapotranspiración al desarrollo de condiciones de sequía en la región Chorotega"

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

Motivación

La región Chorotega sufre con frecuencia el impacto de los eventos secos, durante los cuales las principales afectaciones se asocian con el acceso al recurso hídrico y el desarrollo de actividades productivas, como es el caso de la agricultura y ganadería. Con el pasar de los años, la situación se ha agravado en parte debido a los cambios en el uso del suelo resultado de la expansión urbana y desarrollo de actividades económicas como el turismo, así como la influencia de la variabilidad y el cambio climático. A pesar de la introducción de nuevos sectores socioprodutivos, la actividad económica predominante sigue siendo la primaria (agricultura y ganadería), lo que genera una economía dependiente a los factores del tiempo y el clima. Esto causa una exacerbada vulnerabilidad económica, social y ambiental de la región ante el desarrollo de condiciones de sequía, debido a la afectación de ésta hacia los cultivos y el mantenimiento del ganado. La gestión para atenuar los daños ocasionados se desarrolla, generalmente, de una forma sectorizada dejando pendiente el funcionamiento integrado para una atención óptima a los sectores afectados. Las pérdidas económicas consecuentes, obedecen a una gestión de la información de difícil acceso a los sectores y la ausencia de bases de datos que permitan un acceso rápido y sencillo a la información sobre la variabilidad climatológica y amenazas hidrometeorológicas a las que se enfrenta la región. Se hace fundamental el desarrollo de una métrica aplicable a la región Chorotega, basada en sus características climatológicas, para cuantificar la severidad y duración de la sequía, a fin de conocer la forma en que se desarrollan los eventos secos. Además, es necesario generar información que permita a la población planificar adecuadamente las actividades económicas de manera que se reduzca la afectación durante sequías.

La ocurrencia de un evento seco afecta el complejo sistema hidrológico, causando severos daños a nivel socioeconómico y ecológico. La reducción de la disponibilidad del recurso hídrico se asocia con afectaciones importantes a las principales actividades productivas de una región: producción agropecuaria y turismo. Las condiciones secas ocasionan la pérdida de cosechas, afectan la cadena de empleos directos e indirectos que se generan con la agricultura, dificultan el mantenimiento de las actividades ganaderas, afectan las áreas de conservación y contribuyen con la propagación de incendios forestales. Las condiciones de sequía se asocian con condiciones que favorecen la propagación de incendios forestales ocasionando daños severos a los ecosistemas de la zona, ponen en riesgo la integridad física de los habitantes de los poblados cercanos a las áreas de mayor afectación, así como la integridad de los cultivos. En la región Chorotega, se presenta un sector agroproductivo diversificado que representa cerca del 25% de la superficie nacional dedicada a actividades de tipo agropecuario (INEC, 2015). Este sector genera empleo para más de 28 000 personas, y en 2015 generó cerca de US\$222.6 millones mediante las exportaciones (Comité Sectorial Agropecuario Chorotega, 2015).

Esta región presenta una amplia oferta turística vinculada con la riqueza paisajística y las áreas de conservación, por lo que el estado de los ecosistemas es importante para el desarrollo de este sector.

Esta investigación se enfoca en la importancia de conocer el funcionamiento del desarrollo de condiciones de sequía en la región Chorotega, la influencia de la variabilidad y el cambio climático sobre el desarrollo y propagación de la sequía y evaluar el uso de indicadores de vegetación para el estudio de dicho proceso. Específicamente, incorporar la relación entre las características de la vegetación de la zona y la estimación de la evapotranspiración (ET), dada su importancia desde el punto de vista agrícola. Se propone analizar el comportamiento de la ET a partir de registros observacionales que permitan evaluar el desempeño de modelos regionales para representar esta variable. Lo anterior con el objetivo de determinar si esta variable aporta información adicional para comprender mejor la dinámica del desarrollo de eventos secos e implementar un modelo que facilite la estimación del potencial para el desarrollo de eventos secos bajo escenarios de calentamiento. De esta manera se propone un esquema integral que permita analizar el comportamiento de las condiciones secas para un periodo histórico y a partir de esta información proyectar posibles escenarios con base en las trayectorias de concentración representativa (conocidos como RCP por sus siglas en inglés). El estudio se enfoca en el análisis de la sequía como elemento fundamental de las características climáticas de la región Chorotega en el contexto de la importancia de comprender la dinámica de la sequía para generar información que contribuya a alcanzar las metas de desarrollo sostenible en materia de recurso hídrico y acción climática.

Hipótesis

Este trabajo se basa en la premisa de que la sequía agrícola está vinculada con el agravamiento de las condiciones secas mediante un bucle de retroalimentación negativo con dos mecanismos principales: a) la reducción de la humedad del suelo debido a pérdidas por ET, lo cual induce estrés hídrico en las plantas y afecta la salud de las mismas y b) la vegetación puede recurrir a un mecanismo de protección para evitar la pérdida de agua, cerrando sus estomas para impedir el intercambio o flujo de transpiración hacia la atmósfera, disminuyendo así, las cantidades de ET real (González-Dugo et al., 2017). Al encontrar una superficie con limitado potencial de ET, el aire se vuelve más seco con lo que se reduce la probabilidad de lluvia y se potencia condiciones que contribuyen con el desarrollo de las sequías meteorológicas. Al mismo tiempo, la radiación solar incidente calienta el medio, lo que favorece la acumulación de calor sensible (Miralles et al., 2019) y el principal resultado de la acción de estos mecanismos es un incremento de la aridez (González-Dugo et al., 2017).

La investigación explora, con base en registros observacionales, la relación entre las variables climáticas, hidrológicas y de vegetación que permitan explicar el proceso del potencial

aumento de aridez en la región y su relación con los cambios en la cobertura vegetal. Se evalúa la capacidad de productos derivados de modelos regionales para reproducir el comportamiento de ET y con base en estos resultados identificar los principales cambios en precipitación y ET proyectados, con base en escenarios RCP4.5 y RCP8.5, en la región.

Objetivos

Objetivo general

- Analizar las características de los eventos de sequía en la región Chorotega, durante el período 1980-2019 y evaluar el comportamiento de la evapotranspiración durante esos eventos tomando en cuenta las características de la cobertura vegetal.

Objetivos específicos

- Identificar a través de registros observacional-histórico los eventos de sequía que afectaron a la región Chorotega en el período 1980-2019.
- Determinar la confiabilidad de diferentes índices de sequía para el análisis de paisajes fragmentados.
- Analizar el comportamiento de la evapotranspiración durante el desarrollo de eventos secos extremos, en función de la cobertura vegetal.
- Establecer una relación funcional entre la duración e intensidad de condiciones secas, la evapotranspiración y las variaciones en la cobertura vegetal.

1. Introducción

Ubicada al noroeste de Costa Rica, sobre la vertiente del Pacífico norte, la región Chorotega está conformada por un relieve irregular caracterizado por un sistema montañoso volcánico (Cordillera Volcánica de Guanacaste) al este y extensas llanuras limitadas por el Océano Pacífico (Mora y Portuguez, 2012) al oeste. Cuenta con una extensión total de 10,140 km², divididos en 11 cantones: Liberia, Nicoya, Santa Cruz, Bagaces, Carrillo, Cañas, Abangares, Tilarán, Nandayure, La Cruz y Hojancha. Su clima es de tipo tropical seco o clima de sabana, según la clasificación de Koppen y Geiger (Vargas, 2006).

Durante el período lluvioso, que abarca de mayo a noviembre, se presenta un descenso relativo en las precipitaciones (entre julio-agosto), que corresponde con un patrón observado en otros puntos de la región definido como “*Mid Summer Drought*” (MSD, Magaña et al., 1999). Esta es una característica particular de la región sur de México, Centroamérica y partes del Caribe, que se conoce coloquialmente como veranillo o canícula (Alfaro, 2014). El MSD presenta variaciones entre un año y otro, y es variable en términos de duración e intensidad (Ramírez, 1983; Maldonado et al., 2016). Desde mediados de noviembre y aproximadamente hasta mayo, se presenta un período seco (Vargas, 2006). La cantidad y distribución de la lluvia es modificada como resultado de los modos de variabilidad interanual, siendo el principal modulador regional en esta escala el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS). En su fase cálida (fría) este fenómeno reduce (aumenta) la cantidad de lluvias recibidas en la vertiente pacífica centroamericana (Amador, 1998; Amador et al., 2016; Hidalgo et al., 2017). Los eventos de sequía agravan las condiciones durante el período seco e inciden de forma significativa en la disminución de las lluvias durante el período lluvioso, además influyen en la duración del período seco y lluvioso en la región.

La riqueza bioclimática de la región Chorotega se puede medir actualmente a partir de 16 zonas de vida, según la clasificación realizada por Holdridge en 1974 (**Figura 1**), con predominancia del bosque húmedo premontano de transición a basal y del bosque húmedo tropical (MAG, 2010). En el sector de bajas elevaciones se destaca: el bosque deciduo o bosque seco y la sabana. El primero se localiza entre los 0-700 m.s.n.m., y se trata de una vegetación caducifolia, que pierde sus hojas durante la estación seca. La sabana se desarrolla bajo las mismas condiciones climáticas del bosque seco, aunque en este caso se trata de una formación herbácea que no supera los 2 metros de altura (Vargas, 2006). Esta región alberga el bosque seco, que figura como el ecosistema más amenazado del neotrópico (Banda et al. 2016).

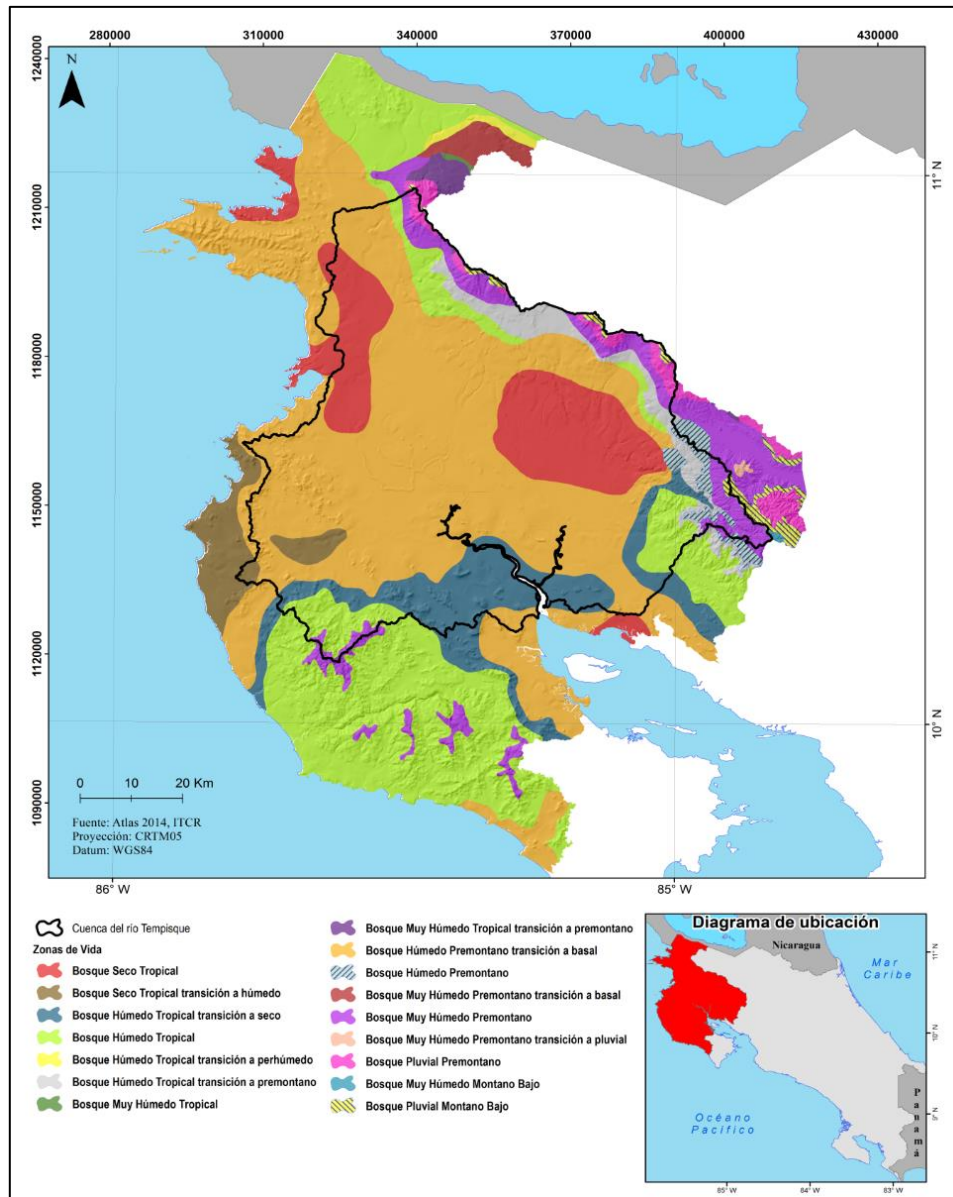


Figura 1. Zonas de vida presentes en región Chorotega según la clasificación de Holdridge (1974). Se muestra una predominancia del bosque húmedo premontano transición a basal y del bosque húmedo tropical. Elaboración propia.

La historia de la región Chorotega es testigo de los grandes cambios derivados de la conversión de una economía tradicional agropecuaria a una tendiente al sector de servicios, que ha provocado transformaciones socioeconómicas y paisajísticas que no siempre son positivas (González y Vilaboa, 2010). Actualmente, el 58% de su superficie (592,642 ha), se dedica a prácticas agrícolas y ganaderas, lo que hace que esta zona sea considerada una de las zonas productivas más importantes de Costa Rica, por la generación de empleos y el aporte a la economía nacional (Hernández Contreras, n.d.).

Dentro de la gran variedad de cultivos anuales, se destaca el arroz por poseer la mayor cantidad de área sembrada: 24,313 ha (Comité Sectorial Agropecuario Chorotega, 2015). Las ventas de arroz alcanzaron las 114 toneladas métricas en 2014-2015, 54.3% de los saldos generados a nivel nacional (CONARROZ, 2015). Para el mantenimiento de la cosecha se requiere: temperatura óptima entre los 20-35°C con variaciones a lo largo de su crecimiento, suficiente radiación solar y una intensidad de viento soportable. Los nutrientes, la erosión, así como la humedad del suelo inciden directamente sobre la productividad (Chaudhary et al., 2003). El cultivo de arroz se da bajo las modalidades de secano (sin riego) y bajo riego en las llanuras de inundación de los ríos Tempisque y Bebedero y los distritos de riego respectivamente (Comisión Mixta de Sequía, 2002). Lo que aumenta la sensibilidad del cultivo al tener una dependencia directa de la disponibilidad del recurso hídrico para el riego.

Otro cultivo sobresaliente en términos de exportaciones es el melón, que logró para el 2014 ingresos por US\$60.3 millones, un 27% respecto a todos los productos exportados por la región (Comité Sectorial Agropecuario Chorotega, 2015). Los requerimientos climáticos incluyen: temperaturas cálidas (18-35°C) durante el crecimiento, y un fijo, pero no excesivo, suministro de humedad (Orzolek et al., 2006). En la región, las plantaciones de melón extensivas se desarrollan en la Hacienda El Pelón de la Bajura, al sureste del río Bebedero, y en la Hacienda Monte Claro, al noroeste del río Tempisque, bajo un sistema de riego por goteo y otras exigencias específicas topográficas y de infraestructura que implican mayores inversiones por área que cualquier otro cultivo de la región (Comisión Mixta de Sequía, 2002).

Dentro de los cultivos permanentes, la caña de azúcar posee el mayor porcentaje (20%) de productores dedicados a la plantación (Comité Sectorial Agropecuario Chorotega, 2015), se ubica en su totalidad en la cuenca del Tempisque (Comisión Mixta de Sequía, 2002), con sus particulares exigencias climáticas: temperaturas de 22-30°C para un óptimo crecimiento, y entre los 10-20°C para la maduración. Necesita además un suplemento de humedad uniforme durante el desarrollo del cultivo de entre 1,500 – 2,500 mm (FAO, 2018). Frecuentemente los ingenios de la región Chorotega practican la quema de caña previa al corte para eliminar el follaje y posibles plagas, una práctica con implicaciones ambientales como lo son la pérdida de nitrógeno y materia orgánica del suelo, que potencia la erosión de los terrenos y se reduce la fertilidad (Larios, 2010). En los últimos años se ha iniciado un trabajo en esquemas de producción más sostenible que incluye una transición hacia sistemas sin quema (Sandhu et al., 2017).

El 34% de los productores, mantienen sus fincas bajo cobertura de pasto (mejorado, natural o de corte), perseverando la ganadería como pilar económico regional, el cual en conjunto con la pesca generó cerca de US\$47.7 millones en el 2014 (Comité Sectorial Agropecuario Chorotega, 2015).

En esta actividad tiene incidencia el terreno y el agua para la supervivencia de los animales, aunque la mayor dependencia es la producción forrajera, que debe ser equitativa a la cantidad de animales de una finca (Hernández Contreras, n.d.).

El tercer sector productivo en importancia, cuyos inicios en la región se dieron en 1950 y que ha ganado peso en los últimos años, es el turismo (Programa Estado de la Nación, 2000). Dada la inversión y ampliación de la oferta turística, durante el 2016 se registró el ingreso de más de 600,000 visitantes al Aeropuerto Internacional Daniel Oduber (Morales y Román, 2017). Además, el empleo en hoteles y restaurantes alcanzó el 12.8% durante el mismo año (Programa Estado de la Nación, 2017). No obstante, la expansión hotelera se ha visto vinculada a la presión por la disponibilidad de recurso hídrico en la región y al surgimiento de conflictos por el agua (Cañada, 2019).

El cambio en el uso del suelo por la introducción de nuevos cultivos, la expansión ganadera, el desarrollo urbano y las infraestructuras turísticas, reemplazó mucha de la cobertura natural por pastos, cultivos y superficies impermeables, resultando en un paisaje fragmentado y un ambiente degradado, especialmente en lo relacionado con fuentes hídricas (Ramírez y Jiménez, 1998). Una de las más grandes alteraciones se presentó en los alrededores de los ríos Tempisque y Bebedero, debido al desarrollo de proyecto de riego y los cambios en fertilidad de los suelos debido a la erosión (Comité Sectorial Agropecuario Chorotega, 2015). Lo anterior se vincula con la consecuente sobreexplotación ambiental que repercute en la respuesta del medio ante intensas lluvias y eventos secos, y se evidencia en la reducción de los depósitos de agua (superficiales y subterráneos) para abastecer a la población (Ramírez y Jiménez, 1998).

La intervención institucional redujo, en cierta medida, la deforestación masiva y la pérdida de biodiversidad mediante el establecimiento de áreas de protección (Programa Estado de la Nación, 2000). Actualmente en la región se ubican 3 áreas de conservación, 8 parques nacionales, 4 reservas biológicas, 17 refugios de vida silvestre, 7 zonas protectoras, 1 reserva forestal, 6 humedales declarados y 2 reservas naturales absolutas, estas áreas destinadas a la conservación cubren cerca de 223,000 ha de la superficie de la región Chorotega (Comité Sectorial Regional Agropecuario Región Chorotega, 2007, Comité Sectorial Agropecuario Chorotega, 2015).

Estimaciones del INEC (2017) para 2016, indican que la región Chorotega está habitada por aproximadamente 317,646 personas (7.6% de la población nacional) y tiene una densidad poblacional cercana a los 37 hab/km² (**Figura 2**), la más baja del país. El desarrollo social que ha acompañado las transformaciones económicas mencionadas, no alcanzó un progreso tan próspero, especialmente en términos de desarrollo humano. La región Chorotega es actualmente una de las zonas con mayor pobreza de Costa Rica (Programa Estado de la Nación, 2000).



Figura 2. Densidad de población por distritos para la región Chorotega de acuerdo al Censo del 2016. La región Chorotega presenta la densidad de población más baja del país; en términos distritales los valores más altos de población se presentan en Liberia, Palmira y Cañas.
Elaboración propia con datos del MIDEPLAN (2017).

Se presenta una disyuntiva, ya que algunos reportes indican que la región cuenta con un alto índice de desarrollo mientras que otros hacen énfasis en aspectos como la pobreza de la zona, la baja escolaridad y alto desempleo. Para el año 2017 se estimó que el índice de desarrollo social (IDS, calculado a partir de indicadores de salud, seguridad, economía, educación y participación social) era de 59.0, correspondiente a la segunda mejor posición a nivel nacional (MIDEPLAN, 2018). La Encuesta Nacional de Hogares (INEC, 2017) estimó una reducción en el índice de pobreza (22.4%) en comparación al año anterior (23.6%), mientras que la pobreza extrema bajó a 8.6%. Las variaciones entre los resultados globales de los diferentes análisis se asocian con modificaciones metodológicas de la encuesta realizada, tal como lo documenta el Programa Estado de la Nación (2017). El promedio de escolaridad en la región Chorotega es de 8.4 años; con cifras altas en educación formal: asistencia del 94.2% de la niñez y adolescencia. De las personas con edades entre los 25 y 39 años, el 48% alcanzó el grado de bachiller en secundaria, ubicando a la región como la segunda más alta del país. Sin embargo, las cifras se vuelven bajas si se trata de educación superior (14.3%), lo que hace que la región Chorotega tenga una fuerza laboral de media y baja calificación (Morales y Román, 2017). El porcentaje de personas sin seguro social es de 18%, considerado como uno de los porcentajes más altos a nivel regional (Morales y Román, 2017).

La región Chorotega alcanza la tasa de desempleo más alta del país (10%), siendo superior entre las mujeres (12.0%) en comparación con los hombres (8.7%), lo que resalta una brecha de género en el desarrollo de actividades productivas y el nivel de ingreso en el núcleo familiar. Entre el 2014 y 2016 se redujo en 7.4 puntos porcentuales el número de hogares en situación de pobreza, 24% de los 114.182 hogares de la región (Morales y Román, 2017). El empleo en la región Chorotega, históricamente ligado a las actividades agropecuarias, durante las décadas recientes se ha encaminado al turismo y al sector de servicios (Programa Estado de la Nación, 2017), lo cual ha tenido incidencia en la reducción del desempleo en la región (Solís Cordero, 2017). No obstante, el empleo vinculado al sector turismo tiene una connotación estacional muy marcada, lo que puede generar inestabilidad si se le compara con los empleos permanentes que se generan en otras regiones. La población económicamente activa es superior a las 171,696 personas (103.351 hombres y 68.345 mujeres), con una tasa de participación laboral del 60%, la segunda más alta, (Morales y Román, 2017). La mayor parte de la fuerza laboral se encuentra ocupada en comercios y actividades turísticas (**Tabla 1**); el empleo en el sector de los servicios domésticos experimentó uno de los crecimientos más significativos desde el 2001 (3.5%). Aunque este sector representa una alternativa para la inserción laboral femenina, se asocia con precariedad laboral y salarios bajos (Morales y Román, 2017), lo cual tiene relación con la pobreza de la región, ya que el 36.1 % de los hogares poseen jefatura femenina (Programa Estado de La Nación, 2017).

Tabla 1. Distribución de las personas ocupadas por rama de actividad

Rama de actividad	Porcentaje
Agropecuario	13.6
Comercio	15.2
Hoteles y restaurantes	12.8
Industria manufacturera	5.0
Construcción	6.7
Enseñanza	7.0
Servicios domésticos	10.0
Otras	29.6

Fuente: Elaboración propia con datos del INEC (2017).

El sector primario representa un porcentaje significativo del empleo en la región (13.6 %), y cuenta con la segunda mayor cantidad de empresas. Sin embargo, presenta las más altas pérdidas de empleo (Calderón et al., 2017). Esta dependencia al sector agropecuario de gran parte de la población, más de 28.000 personas (Comité Sectorial Agropecuario Chorotega, 2015), evidencia uno de los principales retos de la región Chorotega. El mantenimiento y productividad de los cultivos es la mayor preocupación, ante lo cual se debe tener en cuenta la sensibilidad de las plantaciones a las condiciones del tiempo y el clima y ejecutar planes de manejo acordes a la situación.

Los eventos hidroclimáticos extremos (lluvia intensa, sequía) representan un alto riesgo para la región Chorotega debido a las pérdidas económicas que implican. La sequía, hace alusión a un período prolongado de tiempo con disponibilidades de agua por debajo de los niveles normales (Van Loon et al., 2016). La ausencia de precipitaciones (sequía meteorológica), en combinación con un aumento de la demanda atmosférica, puede prolongarse y propagarse hasta el punto de afectar otros componentes del sistema hidrológico (Miralles et al., 2019), donde las características de la cuenca y el clima condicionan la severidad del daño (Van Loon y Van Lanen, 2012). La sección inmediatamente afectada es la humedad contenida en el suelo (**Figura 3**), debido a las pérdidas por evaporación, infiltración y sustracción radicular. Cuando los niveles de humedad en el suelo caen por debajo de los valores normales ocurre una sequía agrícola, denominada de esta forma por la disminución en el suplemento de agua para la vegetación y su vínculo con las pérdidas de cultivos (Van Loon, 2015). Si la afectación alcanza la sección saturada del suelo (depósitos subterráneos), se habla de una sequía hidrológica con incidencia directa en la reducción de los caudales. A medida que un evento seco evoluciona, se presenta una respuesta en la Evapotranspiración actual (E_a), la cual disminuye en función de la reducción de la humedad de los suelos. Esta relación bidireccional está regulada por: a) las condiciones propias del ecosistema: humedad en el suelo al inicio de una sequía, las propiedades aerodinámicas, radiativas; y b) específicas de la cobertura vegetal: profundidad de las raíces y regulación de la conductancia estomática (Miralles et al., 2019). A nivel interno, la vegetación bajo estrés hídrico exhibe un cambio en la fotosíntesis y su capacidad para proporcionar la cantidad de transpiración que la atmósfera demanda; siendo el cambio diferente para cada ecosistema (Cooley et al., 2018).

Los eventos de sequía son frecuentes en la región Chorotega, donde, al igual que gran parte de la vertiente pacífica y región central, se ha estimado una tendencia positiva en la frecuencia y severidad de los mismos (Birkel y Demuth, 2006). De acuerdo con los registros del Comité Sectorial Agropecuario (2015), las sequías contabilizan daños económicos de alrededor de US\$26.71 millones en promedio por año (período 2005-2011). Durante los períodos afines con la fase cálida del ENOS, se conciben los eventos secos más intensos (Coto, 2016), dado el retraso en las precipitaciones y el extensivo déficit hídrico que este fenómeno causa, que genera daños económicos significativos. Por ejemplo, el evento seco de 1997-1998 generó pérdidas para el sector agropecuario por un monto cercano a los ₡2,073 millones (Comisión Mixta de Sequía, 2002), mientras que durante el evento seco del 2014-2015, las pérdidas alcanzaron cerca de ₡15,480 millones (Comité Sectorial Agropecuario Chorotega, 2015).

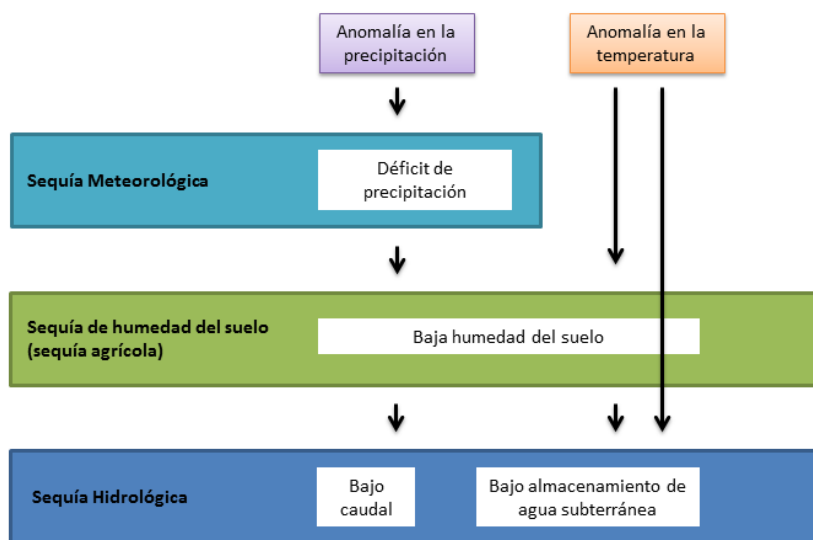


Figura 3. Esquema representativo de las categorías de sequía y su desarrollo. De arriba hacia abajo muestra la evolución de una sequía meteorológica hacia una agrícola e hidrológica debido a alteraciones en la precipitación y temperatura y las diferentes afectaciones hacia los componentes del sistema hidrológico.

Fuente: Van Loon, 2015. Elaboración propia.

Durante los eventos secos se estanca la producción agrícola, y en consecuencia aumenta el desempleo y se reducen las exportaciones. La disminución de los forrajes dificulta el mantenimiento del ganado, que sumado al déficit en el suministro de agua provoca la muerte de muchos animales (Comisión Mixta de Sequía, 2002). A nivel ecológico, se asocian los eventos secos con condiciones que favorecen la propagación de incendios forestales (la región Chorotega registra el 75% de todos los incendios forestales del país). Los incendios se asocian a malas prácticas agrícolas e incendios intencionales, que afectan la biodiversidad y la capacidad de regeneración del suelo (Programa Estado de la Nación, 2000). Entre 1991 y 2001 se quemó más de 33,000 hectáreas, incluyendo cerca de 4,000 ha consideradas como áreas protegidas (Comité Sectorial Regional Agropecuario Región Chorotega, 2007). Las consecuencias de los incendios abarcan muerte de fauna y biomasa, degradación de suelos y afectación de la calidad del aire, además de depositación de sedimentos en los cauces de los ríos, e impactos sobre la infiltración y áreas de recarga acuífera (Comisión Mixta de Sequía, 2002).

Al problema por el déficit causado por la reducción en las lluvias resultado de fenómenos hidrometeorológicos, se le suman problemas de contaminación, sobreexplotación y falta de protección de las fuentes hídricas. Por ejemplo, las descargas de las lecherías, depósitos de tanques sépticos y el basurero a cielo abierto en Tilarán son causantes fundamentales de la alta contaminación medida en el lago Arenal, el cual fluye hasta el Distrito de Riego de Tempisque donde se utiliza para actividades de agricultura y acuicultura (Astorga, 2008).

La demanda creciente del agua para actividades turísticas (mantenimiento de canchas de golf, piscinas y jardines), ha conllevado procesos de sobreexplotación intensiva de los acuíferos en la zona costera, y efectos de salinización que afectan severamente la calidad del recurso, como es el caso del acuífero de Flamingo (Barrantes et al., 2005) o encontrarse en estado crítico, como el acuífero de Playa Panamá (Astorga, 2016).

Las consecuencias de los eventos secos han dado pie a estudios enfocados en analizar la sequía y generar conocimientos e instrumentos de mitigación para reducir las repercusiones de la sequía. En América Latina, Hurtado y Cadena (2002), aplicaron índices basados en precipitación (índice de deciles y el índice normalizado de precipitación (SPI, WMO, 2012) y en el balance hídrico del suelo (el índice de sequía de Palmer (PDSI, Palmer, 1965), índice de anomalía hídrica (z) e índice de disponibilidad hídrica en 24 estaciones ubicadas sobre la región Caribe. Considerando las ventajas y desventajas de cada índice, Hurtado y Cadena (2002), recomiendan el uso del SPI para evaluaciones agrícolas, por las facilidades presentadas y su correlación con el índice de anomalía hídrica que representa mejor el comportamiento de las condiciones secas a nivel de suelo. En el Corredor Seco Centroamericano de El Salvador, Honduras y Nicaragua se desarrolló un estudio que describe las metodologías disponibles para monitorear los diferentes tipos de sequía y el sistema operativo de sequías (SOS), el cual puede ser replicado en toda Latinoamérica (Ravelo et al., 2016). Birkel (2005), desarrolló un estudio de los eventos secos en el Golfo de Fonseca, mediante la recolección de datos climatológicos y socioeconómicos con los que realizó estimaciones de SPI y PSDI, a fin de ser utilizados para pronóstico y planeamiento para mejorar las condiciones de la población de la región, altamente vulnerable a los eventos hidrometeorológicos extremos.

En el contexto de Costa Rica, Birkel y Demuth (2006) aplicaron el método no paramétrico de Mann-Kendall a 17 estaciones fluviométricas distribuidas por todo el territorio con información de 1973 al 2003, para detectar tendencias en la severidad y frecuencia de las sequías hidrológicas; el sector oeste de la zona norte se destacó del resto del país por obtener valores significativos de probabilidad de aumento en el número e intensidad de los eventos secos. En la región Chorotega, registra eventos de sequía desde 1922, Casanova (1993) incurrió en el mapeo de regiones propensas a sequías para planificación de uso del suelo; el estudio utilizó las series de precipitación de varias estaciones de la región, y estimó la evapotranspiración potencial a partir del método de Hargreaves de 1981, destacando las áreas con precipitación anual total menor a los 1,000 mm como las más vulnerables.

Para sequía agrícola, los índices derivados de sensores remotos como el índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI), y el índice de radiación fotosintéticamente activa (fAPAR) son muy utilizados, dada la facilidad para monitorear la variabilidad espacio-temporal de la vegetación, además de las ventajas económicas y técnicas que estos ofrecen (Ravelo et al., 2016) para evaluar la salud y densidad de la cobertura vegetal (Sruthi y Aslam, 2015).

Se ha determinado que los eventos secos afectan la actividad fotosintética de la vegetación, e influyen directamente en la reducción de la verdosidad y productividad. A nivel global Zhao y Running (2010) estimaron una disminución de 0.55 Pg C (Petagramos de Carbono) en la producción primaria neta (NPP, por sus siglas en inglés) para el período 2000-2009. La respuesta a eventos secos es más corta y perjudicial para los ecosistemas húmedos que para los áridos, dada la adaptación de la vegetación de los últimos a déficits hídricos (Maherali et al., 2004; Cooley et al., 2018).

El análisis de la influencia de la superficie en el desarrollo y evolución de la sequía, es una temática reciente, y por tanto con conocimientos aún limitados. No obstante, es un área de creciente interés, dada la reconocida importancia del terreno, no solo en la propagación (mediante procesos hidrológicos), sino también en la intensificación de los eventos secos. Mecanismos de retroalimentación entre la atmósfera y la superficie, además de las condiciones particulares del ecosistema, juegan un papel clave en el desarrollo y evolución de los eventos hidrometeorológicos extremos (Miralles et al., 2019).

Un tópico fundamental en este proceso es la E_a , la cual contempla las pérdidas de vapor de agua del suelo (evaporación) y de las plantas (transpiración), y envuelve una compleja gama de procesos influenciados a su vez por factores dependientes de las condiciones locales (Dunn y Mackay, 1995; McCabe et al., 2019). La ET exhibe una respuesta diferencial al inicio y durante un evento seco, capaz de modificar las condiciones atmosféricas y potenciar el agravamiento de la sequía (Miralles et al., 2019), mediante el inicio o continuación de un ciclo de retroalimentación. Puede también ser considerado un índice de sequía, a partir de la variabilidad del balance simple entre evapotranspiración potencial (ETP) y precipitación (Hidalgo et al., 2005).

Como único enlace entre la superficie y la atmósfera, y debido a su importancia en el transporte de energía, agua y carbono, se ha desarrollado múltiples métodos para medición y cálculo de ET, entre los que se incluyen los directos (lisímetro, tanque evaporímetro, covarianza de torbellino), indirectos (ecuaciones como la de Thornthwaite, Hargreaves, y Penman-Monteith), y remotos (basados en productos derivados de satélites como Landsat y Terra-Aqua).

Las primeras mediciones de ET utilizaban datos observados y se enfocaban en una estimación local, mientras que a partir de la década de 1970 se popularizó el uso de la detección remota (van der Tol y Parodi, 2012), en la actualidad existen productos de ET con variadas resoluciones y amplia cobertura, con lo cual se posibilita la ejecución de modelos numéricos (McCabe et al., 2019).

Cada uno de los métodos presenta limitaciones o desventajas que deben ser considerados antes de su utilización; las técnicas directas son precisas, pero, de muy limitada resolución espacial, pues la estimación solo puede hacerse para sitios específicos. Para los métodos indirectos, existen limitaciones relacionadas con información disponible, variables requeridas y cantidad, según la fórmula considerada (**Tabla 2**).

Muchas ecuaciones están basadas en temperatura o radiación por lo cual únicamente hacen estimaciones de ETP, tasa fundamentada en la energía, sin consideración de la disponibilidad de agua en superficie (Hidalgo et al., 2005). Otras ecuaciones se basan en balance de masa y algunas fórmulas son combinadas (Chaware et al., 2017), permaneciendo el problema en el menosprecio de la influencia de la vegetación, y las condiciones de humedad en el suelo; la ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1965) es considerada la fórmula más precisa, por la incorporación de todos los procesos que interactúan en la ET (Dunn y Mackay, 1995).

Los productos derivados de sensores remotos brindan amplia y continua información en términos espaciales y temporales, sin embargo, los datos medidos por el sensor en cuanto a la temperatura o reflectancia en superficie, pueden verse alterados por condiciones atmosféricas. La adquisición de imágenes de alta resolución espacial solo es posible para bajas frecuencias temporales y viceversa, debido a la nubosidad. Lo que constituye una limitación importante para regiones con periodos de lluvias intensas y alta nubosidad, como es el caso de la región Chorotega que se encuentra en el área de influencia de la Zona de Convergencia Inter Tropical. Otras incertidumbres en la medición están asociadas con viento, resistencia aerodinámica (Liou y Kar, 2014) y la influencia humana (irrigación).

En el contexto del inicio de un evento seco, dominan las condiciones de baja humedad relativa, nubosidad reducida y aire cálido que implican una demanda atmosférica alta que promueve la evaporación de superficie. Dichas circunstancias en conjunto con el déficit de lluvias implican una reducción sustancial de la humedad contenida en el suelo, hasta el punto de alcanzar niveles por debajo del umbral o límite de referencia (humedad del suelo crítica), consecuente con la evolución de la sequía (Miralles et al., 2019). La vegetación también se ve afectada por el déficit hídrico, el flujo de transpiración se vuelve una función de humedad del suelo (Dunn y Mackay, 1995) y por consiguiente se disminuyen los suministros de agua para ser evaporados hacia la atmósfera (**Figura 4**).

El potencial energético (radiación) disponible para la evaporación del agua en superficie se convierte en calor sensible, lo cual a su vez potencia el calentamiento y secado de la capa límite, con implicaciones directas en la generación de nubes y lluvia, es decir que la evapotranspiración controla la división de la radiación, afectando la humedad, temperatura del aire y la formación de nubes (Martens et al., 2018).

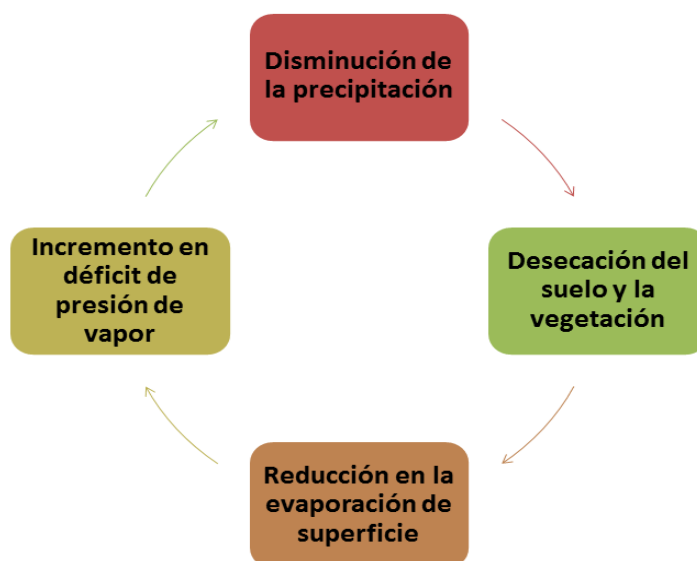


Figura 4. Esquema de retroalimentación atmósfera- superficie durante el desarrollo de las sequías. La reducción en las lluvias, que provoca estrés hídrico y disminución en la humedad del suelo por el cual se reduce el contenido de vapor de agua para ser evaporado por la atmósfera y por ende aumento en el déficit de presión de vapor, puede ser a su vez potenciado por los demás factores antes mencionados.

Fuente: Miralles et al., 2019. Elaboración propia

Las condiciones climáticas regionales, así como particularidades a nivel de cuenca influyen en la prolongación temporal y la magnitud de los eventos secos (Van Loon y Laaha, 2015). Sin embargo, uno de los factores claves de la evolución de la sequía es la humedad del suelo al inicio del evento, por su capacidad de atenuación (Van Loon y Van Lanen, 2012), y su potencial para alterar las condiciones ambientales a través del control de los flujos de energía y de evaporación hacia la atmósfera (Koster et al., 2004) en especial en los climas secos. Asimismo, la humedad del suelo posee un estrecho vínculo con la salud (Ji y Peters, 2003) y la dinámica de la vegetación, ya que es capaz de regular la conductancia estomática y el flujo de transpiración (Miralles et al., 2019; Cooley et al., 2018).

En este sentido, se integra la vegetación al ciclo de retroalimentación atmósfera-superficie, siendo la variabilidad y la fenología una condicionante de los flujos de energía y agua (Green et al., 2017). Las propiedades radiativas, hidráulicas y aerodinámicas son esenciales en la respuesta y la resiliencia del ecosistema (Miralles et al., 2019). Ji y Peters (2003) determinaron que el estado de crecimiento y la madurez de la vegetación influyen directamente en la respuesta de ésta ante la disponibilidad de humedad, siendo durante el

período de desarrollo de los órganos reproductivos cuando las plantas aprovechan íntegramente el suplemento de agua y por tanto es durante este lapso de tiempo cuando son más sensibles a la sequía (Ji y Peters, 2003). Finalmente, en un mundo antropogenizado, los cambios en el uso del suelo y las prácticas de cultivo, como el caso de la irrigación, deben ser considerados para una visión completa de los forzantes y atenuantes de los eventos hidrometeorológicos extremos.

Esta investigación propone la implementación de un marco que integra la componente de la vegetación a la visión tradicional basada en temperatura y precipitación para analizar el papel del desarrollo de condiciones secas en la región Chorotega mediante su relación con ET. Lo anterior, debido a que tradicionalmente se utiliza la evapotranspiración y el estrés hídrico como indicadores del desarrollo de las sequías, dejando de lado muchas veces los procesos que dominan el impacto de las condiciones secas sobre la vegetación. La decisión de analizar la región Chorotega radica en la vulnerabilidad social, económica y ambiental del sector Pacífico Norte de Costa Rica. El análisis de los eventos secos extremos tiene una connotación prioritaria en el contexto del cambio climático, debido a que los escenarios de clima futuro sugieren el agravamiento de las sequías, con las consecuentes amenazas derivadas para el ecosistema y la seguridad alimentaria. Por tanto, y en vista de los problemas presentados en la región Chorotega durante los eventos secos, la finalidad del estudio es generar información, pertinente a las características biofísicas y climáticas de la región, que permita a los diferentes actores sociales desarrollar y ejecutar planes de mitigación y respuesta temprana ante fenómenos hidrometeorológicos secos extremos.

Tabla 2. Métodos indirectos para la estimación de la evapotranspiración

Método	Variabes necesarias	Ventajas	Desventajas
Thornthwaite, 1948 $ETP = 16 \left(\frac{L}{12} \right) \left(\frac{N}{30} \right) \left(\frac{10T_d}{I} \right)^\alpha$	Temperatura media mensual, Número de días del mes máxima cantidad de radiación solar (latitud)	Simplicidad matemática y demanda reducida de datos de diferentes variables meteorológicas (Yang et al., 2017). La consideración de las horas de luz diarias está vinculada con la radiación neta y la capacidad relativa de la fotosíntesis (aplicación ecológica) (Fisher et al., 2011).	Sobreestima la ETP en los trópicos y la subestima en los subtropicales por no tomar en consideración la nubosidad y el déficit de presión de vapor (Yang et al., 2017).
Hargreaves - Samani, 1985 $ETO = 0.0023(t_{med} + 17.78)R_0(t_{max} - t_{min})^{0.5}$	Temperatura máxima y mínima diaria, radiación solar extraterrestre	Obtiene buenos resultados en regiones ventosas y de condiciones semiáridas (Lu et al., 2005).	No es apropiada para regiones cálidas y húmedas (Lu et al., 2005).
Penman - Monteith FAO (Allen et al., 1998) $ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$	Temperatura máxima y mínima, radiación solar, horas de sol, velocidad del viento y humedad relativa a escala diaria (Chaware et al., 2017).	Determina mejor la evapotranspiración del cultivo	Requiere una base extensa de datos climáticos a escala diaria, muy difícil de conseguir (Chaware et al., 2017). Complicada aplicación en ecosistemas diversos (muchas especies diferentes) que difieren en la resistencia de las estomas, las cuales son difíciles de calcular; se introduce un error (Fisher et al., 2011).
Turc, 1961 $ET_r = \alpha((23.9001R_s) + 50)\left(\frac{T}{T + 15}\right)$	Temperatura promedio diaria, radiación solar, humedad promedio diaria	Buenos resultados para regiones de condiciones húmedas y cálidas (Lu et al., 2005). Requiere poca información	Sobreestima la ETO durante la temporada seca y subestima en época de lluvias (Diouf et al., 2016).
Priestley - Taylor , 1972 $ET = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G)$	Temperatura promedio diaria, radiación neta y radiación extraterrestre	Produce resultados similares a los de Penman-Monteith y es más fácil de aplicar (Shuttleworth and Calder, 1979).	Buenos resultados para regiones de condiciones húmedas y cálidas (Lu et al., 2005). Requiere poca información. Refleja la evaporación para terrenos húmedos y aire saturado (Fisher et al., 2011).

2. Datos y métodos

1.1. Datos

Distintas fuentes y productos de información fueron utilizados a lo largo del desarrollo de esta investigación. De acuerdo con la disponibilidad de datos y su adecuación con los objetivos planteados en términos de resolución espacial y temporal, el uso de algunos productos fue descartado en función de periodos de cobertura, variables disponibles y resolución espacial. En una evaluación inicial se identificaron potenciales bases de datos de interés para el estudio y se hizo una revisión de sus características. En función de la disponibilidad de observaciones *in situ*, se evaluó la capacidad de productos derivados de modelos y estimaciones satelitales para representar variables en la escala espacial del estudio. Por consiguiente, algunas bases de datos fueron descartadas al presentar desviación alta en comparación con los rangos observados. Las variables utilizadas comprenden información observada (estaciones meteorológicas pertenecientes a la red del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y facilitados por el IMN a través del contrato IMN-DIM-CM-117-0917), productos derivados de sensores remotos (**Tabla 3**), el histórico del uso de suelo y cobertura vegetal generado a partir de imágenes LANDSAT así como índices climáticos seleccionados. Adicionalmente, se utilizó las proyecciones con base en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 desarrollados por Cabos et al., (2019). La información utilizada forma parte de la colección de datos recopilada y generada como parte del proyecto B7507 “Efectos del Cambio Climático observado sobre el ciclo hidrológico y la disponibilidad de recurso hídrico en la región Chorotega” financiado mediante el programa de Fondo de Incentivos del MICITT.

Tabla 3. Variables utilizadas en la investigación

Variable	Resolución espacial	Resolución temporal	Fuente	Estado
Precipitación	Est. meteorológicas	Diario (25 años)	Proyecto VI805-B3600	Preparado
	25 km	Diario (1980-2099)	Proyecciones ROM	Preparado
Temperatura	Est. meteorológicas	Diario (25 años)	Proyecto VI805-B3600	Preparado
	25 km	Diario (1980-2099)	Proyecciones ROM	Preparado
MEI		Mensual (1950-2018)	NOAA	Preparado
NDVI	250 m	Mensual (2003-2016)	MODIS/Aqua	Evaluado
	5600 m	Mensual (2000-2019)	MODIS TERRA	Evaluado
	333 m	10 días (2014 – 2017)	PROBA- V	Descartado
Humedad del suelo	0.25°	Diario (1978 – 2016)	ESACCI	Descargado
	0.125°	Diario (2002-2019)	GRACE	Descartado
	25 km	Diario (1998-2014)	TRMM	Descartado
	1°	Mensual (2000 – 2019)	GLDAS	Evaluado
Cobertura	30, 79 m	Anual (1979-2017)	Proyecto VI805-B7507	Procesado

Elaboración propia.

2.1.1 Registro de estaciones meteorológicas

Con base en el registro del IMN, se procesó las 28 estaciones correspondientes a la región Chorotega (**Figura 5**), de las cuales 25 y 21 poseen información de lluvia y temperatura respectivamente. El registro temporal comprendido por las estaciones abarca desde 1938 hasta el 2019, variando entre estaciones, lo cual hizo difícil la determinación de un período común. También es variable la cantidad de datos faltantes entre estaciones y entre las variables climatológicas medidas (precipitación, temperatura máxima y mínima). El promedio de datos faltantes es de 21% en el caso de la lluvia (ver **ANEXO 1**) mientras que la temperatura máxima diaria alcanza el 40%, también superada por la temperatura mínima (53%). Para el estudio se utilizó solo aquellas estaciones con un umbral máximo de 20% de datos faltantes (19 de precipitación y 11 de temperatura). No se aplicó rellenado de datos, debido a la ausencia de estaciones cercanas en el período común (1999-2019) que facilitarían el test de homogeneidad y a la distribución temporal de los datos faltantes.

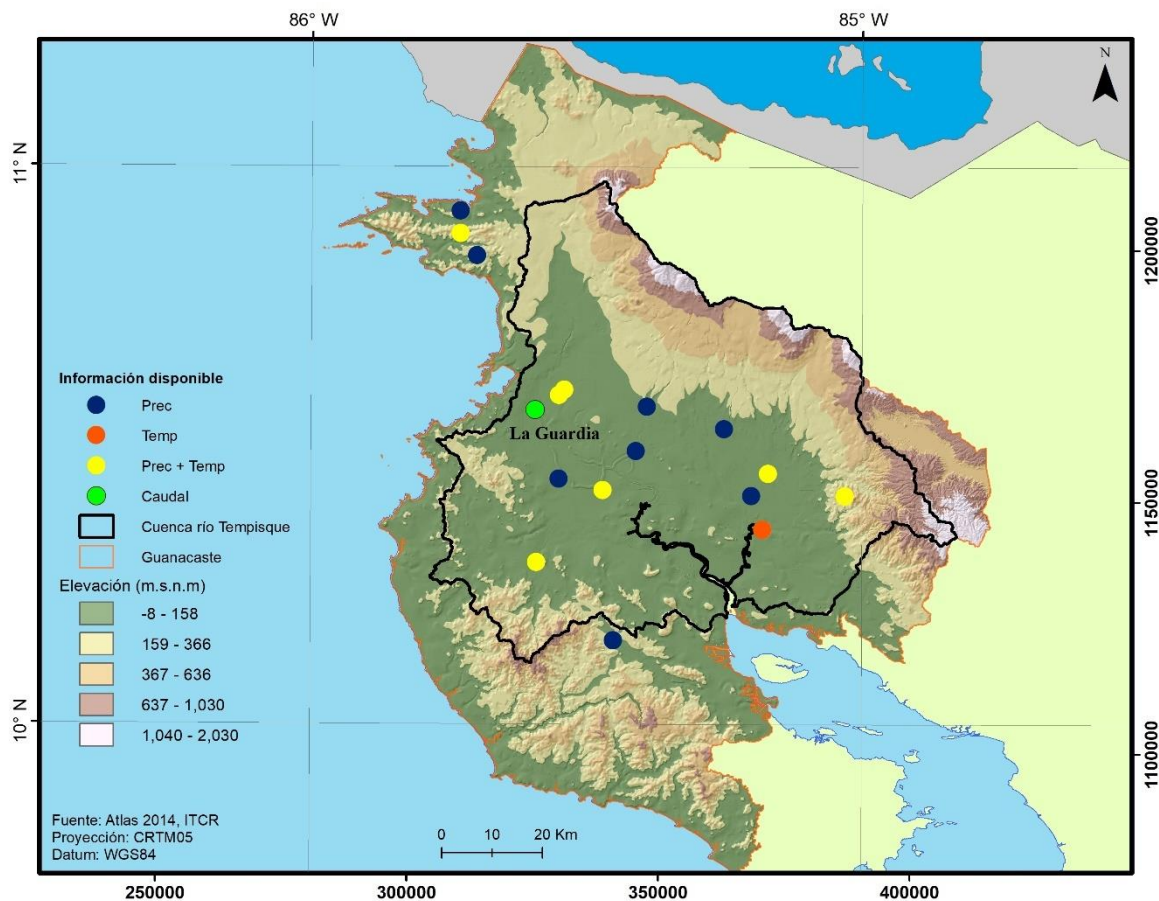


Figura 5. Distribución de las estaciones meteorológicas utilizadas, con información de las variables climatológicas disponibles (precipitación, temperatura o ambas) para la región Chorotega. Elaboración propia.

2.1.2 Índice Multivariado de El Niño

Tres índices de variabilidad climática se obtuvieron de *NOAA Earth Science Research Laboratory's Physical Science Division* (ESRL PSD): MEI (*Multivariate ENSO Index*), Niño 3.4 y PDO (*Pacific Decadal Oscillation*; Mantua y Hare, 2002). Los dos primeros relativos a la fase e intensidad de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), una variación de alta frecuencia (2-7 años), considerado un modo primario de variabilidad sobre el planeta (Martens et al., 2018), con un reconocido aumento anómalo de la temperatura superficial del mar y niveles negativos de presión del mar en la costa occidental americana durante su fase cálida, radicando en cambios en los patrones de precipitación sobre todo el Pacífico tropical. El tercero corresponde a una variación de baja frecuencia (10 – 12 años) con influencia sobre la temperatura superficial del mar en el Pacífico Norte; durante su fase cálida refuerza la influencia de los eventos de El Niño en la región (Amador et al., 2016).

2.1.3 Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés)

El NDVI es un indicativo de la verdosidad de las plantas. Los valores de reflexión de la superficie terrestre son normalizados (desde -1 hasta 1), donde los valores negativos son referentes a cuerpos de agua (Meneses – Tovar, 2011). Con este índice es posible distinguir los períodos en los que los cultivos y la vegetación pierden sustancialmente su biomasa. Se utilizaron tres fuentes para la descarga de la información del NDVI:

- MODIS/Aqua (MYD13Q1), el cual deriva información relativa a la verdosidad de la superficie terrestre mediante el radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR, por sus siglas en inglés) de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), a una resolución espacial de 250 metros (grilla de 4800 x 4800). El producto se consigue eligiendo el mejor valor de un período de 16 días considerando características como: baja nubosidad y el más alto valor de NDVI (LP DAAC, n.d.).
- MODIS/TERRA (MOD13C2), este producto se deriva igual que el MODIS/Aqua y se presenta en la misma escala temporal (mensual), pero difiere en su resolución espacial (5600 metros o 0.05 grados), y en que es un producto libre de nubes lo cual se logra mediante el remplazo de las nubes con la climatología registrada por el MODIS (LAADS DAAC, n.d.).
- La colección de datos de VITO, el producto derivado de la misión PROBA – V (PROBA-V S10 TOC NDVI), consta de una resolución espacial de 333 metros y temporal de 10 días, con información recolectada desde el 2013 hasta la actualidad (VITO, 2014-2017).

Los tres productos fueron revisados con base en la cobertura temporal y el alcance de la resolución espacial, en el caso de la información derivada de VITO, se decidió no hacer uso del producto debido a que el período es relativamente corto comparado con el período de interés de la investigación.

2.1.4 Humedad del suelo

La humedad de suelo es la variable que presentó mayor dificultad para su evaluación debido a la falta de mediciones *in situ* de esta variable de forma continua. La mayoría de los datos encontrados corresponden a mediciones puntuales en períodos muy cortos de tiempo y en localidades en que la resolución de los derivados satelitales es muy limitada. La evaluación que se realizó consistió en determinar que los cambios mensuales en la humedad del suelo fueran consistentes con el ciclo anual de la precipitación. En el caso de esta investigación se implementó los siguientes productos:

- ESACCI, producto de sensores remotos para información relativa al contenido de humedad en el suelo, correspondiente a la *European Space Agency Climate Change Initiative Phase II* (ESA CCI v 04.2). Este producto satelital es resultado de la recuperación y combinación de productos de humedad superficial con instrumentos de detección remota (pasivos y activos) de microondas. La información disponible posee una escala global (0.25° de resolución), desde 1979 hasta el 2016 en resolución diaria (Chung et al., 2018). Además de la resolución insuficiente, el análisis de variación de ciclo interanual, con información de ESA CCI, determinó muy pocas variaciones entre un año y el otro, lo cual no es consistente con lo observado, por lo cual se descarta el uso del producto en la investigación.

- TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), misión satelital en operación desde 1997 y hasta 2015 de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), cuyo objetivo era medir la precipitación en los trópicos (distribución y variabilidad), el producto de humedad del suelo se basa en el generador de imágenes del microondas (TMI, por sus siglas en inglés) del modelo de recuperación de parámetros terrestres (LPRM, por sus siglas en inglés). La resolución espacial del producto es de 45 km y la resolución temporal utilizada en este trabajo es mensual (GES DISC, n.d.).

- GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), obtenido a partir de los satélites de órbita baja de la NASA desde el 2002, con mediciones en el espectro de microondas de los cambios gravitatorios terrestres como estimación de alteraciones en la masa de la superficie representativos del contenido total de agua en el terreno. La resolución espacial de los datos se considera gruesa (300-400km) y la escala temporal del producto evaluado es mensual (NCAR UCAR, 2020).

- GLDAS (*Global Land Data Assimilation System*): modelado terrestre global de alta resolución que simula el estado de la superficie y de los flujos (humedad del suelo, temperatura del suelo, calor latente y calor sensible) en tiempo casi real a través del acople de observaciones satelitales y sobre el terreno. La resolución de los datos en escala mensual se genera promediando los productos cada 3 horas (Bi et al., 2016). El modelo utilizado NOAH10_M tiene una resolución espacial de 1°.

2.1.5 Coberturas

La incorporación del factor antropogénico, se fundamenta en el uso del suelo, para lo cual se utilizó capas anuales desde 1979 hasta el 2017 con información de coberturas de la región Chorotega. Este producto generado por el proyecto VI805 B7507, fue el resultado final de la descarga de imágenes multispectrales de la misión Landsat, así como las correcciones pertinentes de éstas (atmosférica, radiométrica y geométrica) y la clasificación del paisaje de la región. Cada capa contiene 10 clases de uso del suelo: urbano, manglar, bosque, pastos, cultivos permanentes, nubes, sombras de nubes, terreno descubierto, área quemada y cuerpos de agua. La resolución espacial varía dependiendo del satélite Landsat del cual se obtuvo la imagen (79, 30 metros). Debido a los resultados de la validación de los productos de NDVI en la más alta resolución, el uso de la información de coberturas históricas se descartó para esta investigación en particular.

1.2. Métodos

2.2.1 Caracterización climatológica

Utilizando los registros diarios de las estaciones meteorológicas, se generó series diarias, mensuales y anuales de las variables precipitación y temperatura. Con los acumulados mensuales de precipitación se estimó las anomalías normalizadas de lluvia, para posteriormente determinar su correlación con los modos de variabilidad con mayor probabilidad de influencia sobre la precipitación de la región Chorotega (MEI, El Niño 3.4 y PDO). La correlación fue estimada con base en las ecuaciones de Pearson y Spearman. Se generó los ciclos anuales climatológicos de precipitación, temperatura media, máxima y mínima y se identificó la presencia de tendencias (significativas) en los diferentes parámetros.

2.2.2 Estimación de evapotranspiración

Los promedios mensuales de temperatura fueron utilizados para la estimación de la evapotranspiración, de acuerdo a la fórmula de Hargreaves, por ser una de las mediciones indirectas que requieren la menor cantidad de variables para el cálculo. Lo anterior en consideración de que la información de viento y radiación no está disponible para todas las estaciones.

La función definida por Hargreaves (1994);

$$ET_0 = 0.0023 * RA * (T_c + 17.8) * TD^{0.50} \quad (1)$$

Fue propuesta como alternativa para la medición de la evapotranspiración de referencia (ET_0) mediante la radiación extraterrestre (RA) en mm/día, la diferencia entre el promedio máximo y promedio mínimo de temperatura (TD) en °C, y la suma del máximo y el mínimo de temperatura dividido entre 2 (T_c).

La estimación se hace en escala mensual, la radiación es estimada en base a la latitud. Se empleó la librería SPEI del software de programación R y el respectivo comando para la automatización de la ET_0 . Posteriormente con información obtenida para algunas estaciones que contaban con datos de humedad relativa y radiación se hizo la corrección de la radiación neta utilizando la aproximación del día juliano, y siguiendo la formula descrita por Dunn y Mackay (1995), se estimó la evapotranspiración real según la ecuación de Penman-Monteith;

$$E_a = \frac{Rn \Delta + \frac{\rho C_p \delta_e}{r_a}}{\lambda[\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)]} \quad (2)$$

Rn es la radiación neta en $W m^{-2}$, ρ es la densidad del aire en $kg m^{-3}$, C_p es el calor específico del aire a presión constante ($J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$), δ_e es el déficit de presión de vapor del aire (mbar), Δ es el gradiente de presión saturado de vapor en $mbar ^\circ C^{-1}$, γ es la constante psicométrica ($mbar ^\circ C^{-1}$), λ es el calor latente de vaporización del agua en $J kg^{-1}$ y r_a es la resistencia aerodinámica medida en $s m^{-1}$, función de $208/U_2$ donde U_2 es la velocidad del viento a 2 metros; finalmente, r_s es la resistencia de superficie, un valor para todas las plantas del cultivo analizado en $s m^{-1}$, que depende del área foliar (Dunn y Mackay, 1995). Para r_a , a falta de información precisa de viento, se utilizó un valor de 50 m/s, mientras que para r_s el valor utilizado fue de 69 m/s, ambos valores son basados en cursos previos de la maestría en hidrología. En este caso, en función de la ubicación de las estaciones disponibles, se determina que se encuentran ubicadas en zonas dedicadas mayoritariamente a la ganadería, con suelos cubiertos principalmente por pastizales. Con base en esto, se considera la simplificación de que $Kc \sim 1$, con lo que $E_a \cong ET_0$

Se comprende que existe una limitación al no contar con información observacional para todas las variables, sin embargo, se considera relevante realizar la estimación. Lo anterior con el objetivo de determinar el impacto que podrían tener estimaciones simplificadas de ET para la identificación de los periodos con ocurrencia de sequía y motivar el apoyo de mejoras en la instrumentación disponible.

2.2.3 Aridez

El concepto de aridez debe ser separado del término sequía, dado que este último se refiere a una amenaza natural temporal, mientras que la aridez se define como un elemento climático (Sanderson, 1992), una condición relativa o permanente de un clima árido (Van Loon, 2013) que depende de la ET y de la precipitación, en función de la humedad y la capacidad de mantenimiento del ecosistema (Maliva y Missimer, 2012). Al determinar el equilibrio hídrico de un sector, representa el potencial de agua disponible, de gran utilidad para la evaluación y el manejo de los sectores socioeconómicos (Asadi Zarch, 2015).

En el caso de zonas áridas como la región Chorotega, la medición de la aridez puede resultar en una herramienta de utilidad para la gestión del ámbito agroproductivo de la zona. Un estimado de la aridez se obtuvo como el cociente entre la precipitación y la ETP, ésta última calculada a partir de la ecuación,

$$E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(R_n + A_h)}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{6.43 (1 + 0.536 U_2) D}{\lambda} \quad (3)$$

Donde E_p es la tasa de evaporación potencial, A_h es la energía advectada del cuerpo de agua (no es significativa en este caso por lo cual su valor es 0), y D es el déficit de presión de vapor (Maidment, 1993). Los estimados de aridez se realizaron a escala anual y se ejecutó un análisis de correlación mensual entre la aridez y el NDVI

2.2.4 Cálculo de índices para análisis de sequía

Los registros mensuales derivados de los datos meteorológicos, se utilizaron para el cálculo del índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés). El SPEI, es un método indirecto desarrollado con la intención de evaluar la sequía, basado en los dos principales elementos del ciclo hidrológico. El fundamento del cálculo está relacionado con el balance climático mensual (diferencia entre la lluvia y la cantidad de agua evapotranspirada), como medida simple de la excedencia o déficit de agua por mes. La evaluación se puede realizar en múltiples escalas, permitiendo reconocer el alargamiento y propagación de la sequía al sistema hidrológico (Vicente- Serrano, et al., 2010). El cálculo de este índice se efectuó de manera automatizada mediante el uso de la librería SPEI de R, siendo necesario estimar previamente la diferencia mensual entre la precipitación y la evapotranspiración, como única entrada del cálculo. La estimación se realizó en escalas de 1, 2, 3, 6, 9 y 12 meses.

Adicionalmente, se estimó el índice estandarizado de precipitación (SPI, por sus siglas en inglés), el cual determina los períodos secos con base en los déficits de lluvia. Los registros históricos de precipitación se ajustan a una distribución de probabilidad y posteriormente a una distribución normal donde el cero corresponde al valor promedio o normal, mientras los valores negativos (positivos) son indicativos de periodos secos (húmedos). La estimación se puede realizar en múltiples escalas (WMO, 2012), reflejando el impacto de la sequía en la disponibilidad hídrica de los recursos superficiales (en escalas cortas) y subterráneos (en largas escalas). Los valores posibles de SPI se agrupan en 7 clases (**Tabla 4**). Se utilizó nuevamente la librería SPEI de R con el comando SPI para el cálculo automatizado de este índice, en un rango de escalas desde 3 hasta 36 cada 3 meses.

Las series de SPEI 12, en conjunto con las anomalías estandarizadas de precipitación, se tomaron en cuenta para la identificación de los eventos secos. En esta sección se siguió el procedimiento descrito en López-Moreno et al., (2009) con la excepción de que en lugar del SPI, se utiliza el SPEI con una escala de 12 meses, lo cual obedece a la introducción de un umbral en el cual se pasa de la sequía meteorológica a una sequía hidrológica, esto implica que al considerar la ET hay una menor correspondencia entre el SPEI y las anomalías de precipitación.

Tabla 4. Categorías de SPI

>2.0	Extremadamente húmedo
1.5 a 2.0	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Cerca de lo normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
-2 y menos	Extremadamente seco

Fuente: Adaptado de WMO, 2012.

Se considera que una sequía corresponde al período durante el cual se obtuvo un valor negativo de SPEI y una anomalía de precipitación menor a -1. En cada uno de los eventos, determinados bajo dichas condiciones, se estimó el déficit de precipitación con base a la climatología mensual de cada estación.

2.2.5 Modelo de partición de la transpiración

La partición del agua, principal interés, es incierta al utilizar un modelo simple (ver **ANEXO 3**). Por tanto, el modelo existente se calibró para estimar una partición de agua más robusta basada en el *Leaf Area Index* (LAI) y un acople de los flujos de agua con un transporte de trazadores. De tal manera, se justifica la separación de la ET, se permite ahorrar parámetros calibrados y se puede verificar las simulaciones mediante isótopos estables del agua. Mediante el uso del LAI se determina el rol de la vegetación en el proceso de intercepción (Deshape et al., 2018). Los isótopos son trazadores naturales que permiten conocer sobre los procesos hidrológicos de una cuenca; como parte de la molécula del agua, el deuterio ($\delta^2\text{H}$) y el oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) son ideales para identificar la huella química que reflejan los procesos atmosféricos, mezcla entre reservorios y demás transformaciones ocurridas durante el proceso de precipitación-escorrentía (Alvarado, 2018).

El modelo resultante de tipo TAM (*Tracer-aided rainfall-runoff Model*) es un modelo semi-distribuido que separa los procesos ocurridos en las partes altas de la cuenca de los que ocurren en la zona riparia (ribera del río) similar a Birkel et al., 2015 (**Figura 6**). Implementa un módulo de intercepción basado en Rutter et al., (1972) y ligado a LAI de forma similar al modelo STARRtropics (*Spatially distributed Tracer-Aided Rainfall-Runoff*, Dehaspe et al., 2018 y Correa et al., 2020).

A diferencia de Correa et al. (2020), el modelo desarrollado aquí implementa una estimación de un LAI variable en el tiempo mes a mes para reflejar la influencia estacional de la vegetación sobre el ciclo hidrológico. Adicionalmente, el modelo acopla a los isótopos estables del agua (deuterio y oxígeno-18) a los flujos de agua mediante un balance de masas para cada reservorio.

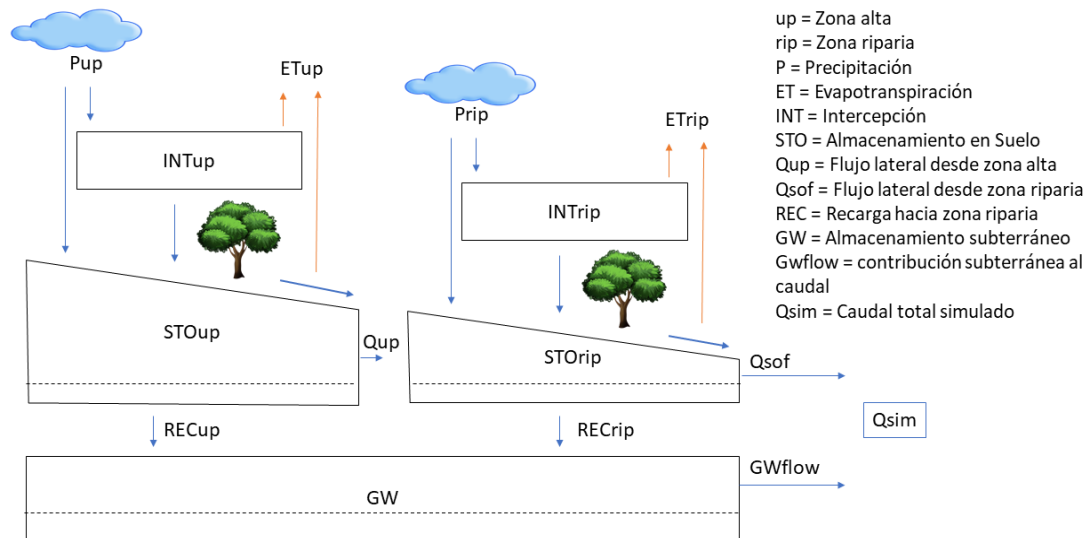


Figura 6. Diagrama esquemático del modelo de partición de la transpiración.
Fuente: Birkel et al., 2015; Deshaje et al., 2018. Elaboración propia.

Además de la precipitación y la ET, el modelo requiere como entrada la información mensual de caudal observado, composición isotópica en lluvia y en caudal, y LAI. Todos los datos observados tienen la misma fuente descrita en el primer modelo; la información de los isótopos fue recolectada semanalmente desde 2014 en Liberia, y desde el 2018 en el río Tempisque (estación La Guardia) por el Dr. Ricardo Sánchez Murillo et al. (sin publicar). Los datos isotópicos semanales en lluvia fueron ponderados usando el volumen semanal de lluvia para llegar a un valor isotópico mensual. Las composiciones isotópicas semanales del Río Tempisque se promediaron a valores mensuales.

La estimación de LAI mensual representativa para la cuenca de estudio se realizó en la plataforma *Google Earth Engine* como promedio de todos los productos satelitales disponibles para la zona de estudio, específicamente Copernicus, MODIS, NOAA, JAXA1, JAXA2.

El módulo de intercepción contempla la fracción de cobertura en superficie mensual (SFC) determinado con el valor de LAI mensual y el coeficiente de extinción k , en este caso se utilizó un valor de k de -0.463 (Ruter et al., 1972).

Con el SFC y el LAI se estima el umbral de intercepción, del cual depende la precipitación que ingresa a los almacenamientos.

Con el valor de SFC se determina también la evaporación y la transpiración siguiendo el procedimiento de Simunek et al., 2009.

$$T_p = ET_p * (1 - e^{-k*LAI}) = ET_p * SCF \quad (3)$$

$$E_p = ET_p * e^{-k*LAI} = ET_p * (1 - SCF) \quad (4)$$

Donde ET_p , T_p y E_p son los flujos de evapotranspiración, transpiración y evaporación potencial respectivamente (Simunek et al., 2009).

En el almacenamiento en suelo se evalúan el flujo lateral (Q) que aporta agua al caudal, así como la recarga subterránea, mientras que en el reservorio de agua subterránea se estima el flujo base (GW_{flow}) que contribuye en la descarga total (Q_{sim}). El modelo evalúa todos los procesos representados en ambas áreas, con la única diferencia en la consideración de que el flujo lateral proveniente de la parte alta contribuye en el reaprovisionamiento del almacenamiento en superficie de la zona riparia. En la **Tabla 5** se describen los parámetros del modelo, y los reservorios con los valores iniciales de cada uno.

Tabla 5. Parámetros y reservorios del modelo de partición

Parámetros	Descripción	Valor inicial
<i>Reservorio de intercepción</i>		
k	Fracción de cobertura (Rutter et al., 1972)	-0.463
beta	Coefficiente de intercepción relacionado con LAI	4.5
<i>Reservorio en suelo</i>		
STOup	Almacenamiento en suelo (zonas altas)	500
a	Coefficiente de almacenamiento lineal (laderas de flujo lateral)	0.3
R	Coefficiente de almacenamiento lineal (recarga de agua subterránea)	0.88
STOrip	Almacenamiento en suelo (zonas riparia)	200
alpha	Coefficiente de almacenamiento lineal (zona riparia)	0.15
c	Coefficiente lineal de almacenamiento de flujo (zonas riparias)	0.49
<i>Reservorio subterráneo</i>		
GW	Almacenamiento subterráneo	1000
b	Coefficiente de almacenamiento lineal (agua subterránea)	0.013
<i>Módulo isotópico</i>		
upSd	Volumen de almacenamiento adicional (agua inmóvil), zonas altas	1985
ripSd	Volumen de almacenamiento adicional (agua inmóvil), zonas riparias	498
gwSd	Volumen de almacenamiento adicional (agua inmóvil), agua subterránea	4999

Elaboración propia

El módulo isotópico evalúa la transformación de composición isotópica (deuterio) en la precipitación a los flujos de caudal, en el volumen de almacenamiento y en el caudal total.

De las múltiples iteraciones generadas se seleccionaron los mejores resultados en base al criterio de eficiencia KGE (*Kling-Gupta Efficiency*) tanto para caudal como isótopos estables de agua.

2.2.6 Proyección de eventos secos con base a escenarios RCP4.5 y RCP8.5

Para incluir un análisis de lo proyectado por escenarios futuros en relación a los potenciales cambios futuros en las condiciones de sequía en la región de estudio, se hace uso de las proyecciones generadas por Cabos et al. (2019). Estas proyecciones fueron desarrolladas a partir de una serie de experimentos con el modelo regional ROM que incluye acople oceánico. La razón para seleccionar estas proyecciones se basa en que es el primer producto generado para la región en que se considera de forma explícita el acople oceánico que es fundamental para una mejor captura de las características climáticas regionales. Las simulaciones corresponden al período histórico 1980-2006 con proyecciones al 2099 en resolución de 25km en un dominio CORDEX Centroamérica extendido. Debido a que la resolución es más gruesa que la escala local representada por las estaciones meteorológicas disponibles, se aplicó a las simulaciones el proceso de reducción de escala estadística utilizando un método de corrección de sesgos para la cual se empleó la información del registro meteorológico disponible para el estudio.

Con base en la información diaria de precipitación, temperatura media, máxima y mínima se generó los escenarios de eventos secos, aridez, así como proyección para el modelo de partición. Se indica que en las proyecciones la población no es una variable representada en el modelo y tanto la cobertura vegetal como el uso de suelo son estáticos, por lo que las proyecciones se basan en los cambios derivados a partir de los RCP4.5 y RCP8.5 y no se incluye otra influencia antropogénica explícitamente.

3. Caracterización climatológica de la región Chorotega

Se presenta una caracterización climatológica de la región Chorotega tomando como base el registro meteorológico histórico para estaciones en Liberia, Nicoya, Bagaces y Santa Cruz. El objetivo es dar un contexto al análisis realizado y explicar con mejor detalle la importancia de las observaciones del estudio con enfoque en la climatología, así como la comparación entre los métodos para la estimación de la ET en función de la información disponible.

3.1. Precipitación.

La región se caracteriza por ser la zona más seca del país, sin embargo, estas son condiciones secas relativas ya que la precipitación acumulada anual mínima de esta región excede los 1,000mm. La distribución espacial discontinua de la precipitación sobre la región Chorotega muestra los acumulados anuales más bajos en dos de las estaciones ubicadas sobre el cantón de Liberia y en la estación de Hacienda Mojica (**Figura 7a**); mientras que en la estación Finca Las Huacas y en los sectores cercanos al Golfo de Nicoya y cerca de la costa suroeste se presentan acumulados cercanos a los 1800 mm. La cercanía con la región montañosa al noreste de la región juega un papel muy importante es la distribución espacial de la precipitación, para la cual la topografía es de gran importancia.

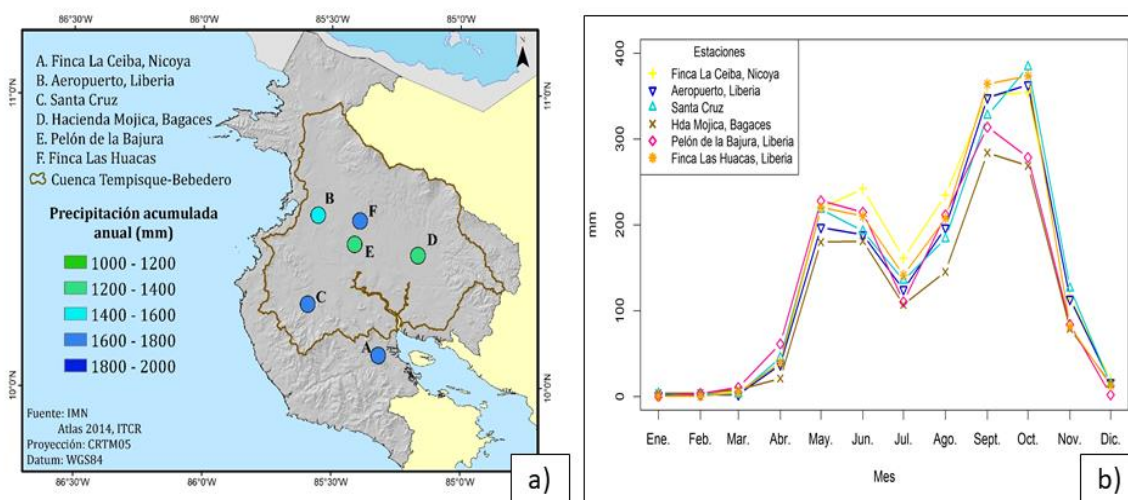


Figura 7. a) Precipitación acumulada promedio anual y b) Ciclo anual de la precipitación, para el período 1999 – 2019, basado en los datos observados de cada una de las estaciones meteorológicas. La distribución espacial no presenta un patrón particular, el comportamiento es de tipo bimodal, el MSD provoca un descenso en la lluvia a mediados de la temporada lluviosa.

Fuente: IMN. Elaboración propia.

El comportamiento mostrado del ciclo anual de la lluvia es de tipo bimodal (**Figura 7b**), característico de la región Pacífico Norte de Costa Rica con dos períodos de lluvia interrumpidos por una reducción de la precipitación durante el mes de julio.

Esta característica corresponde al patrón del período conocido como “*veranillo*” o *Mid-Summer Drought* (MSD, Magaña et al., 1999).

Al período de reducción de lluvias da continuidad una segunda temporada de lluvias caracterizada por una mayor cantidad de precipitación, así como eventos de mayor intensidad (Cooley et al., 2018). Las lluvias del segundo período se asocian principalmente al paso de sistemas de escala sinóptica como ondas tropicales, y la influencia indirecta de los ciclones. Los eventos asociados con precipitación cuya afectación se extiende por varios días (aunque de diferente origen) se conocen popularmente como “*temporales*” y en ocasiones se relacionan con la circulación de aire en el Pacífico que produce lluvias cuando se encuentra con la cordillera (Alfaro et al., 2010), de aquí la importancia de la topografía para esta región. Durante este período de lluvias se concentra una mayor cantidad de emergencias por el efecto de inundación en la región, destrucción de puentes y carreteras, deslizamientos y anegación de terrenos con las consecuentes pérdidas para el sector agropecuario, el cual por lo general está ubicado en planicies y márgenes de los ríos (Sánchez, 1990). Posteriormente se inicia una disminución constante en la precipitación hasta alcanzar valores mínimos en el mes de diciembre, dando paso a la estación seca que se mantiene hasta el mes de abril aproximadamente.

En el período 1999-2019, se observa un comportamiento similar entre todas las estaciones durante la temporada seca, con valores mínimos o menores en comparación a la estación lluviosa. A partir de abril se presenta un aumento sustancial en las precipitaciones, alcanzando el primer pico máximo de lluvia en mayo, o junio (estación Finca La Ceiba), con un promedio cercano a los 219 mm. Después del descenso en las precipitaciones debido a la influencia del MSD, se presenta un aumento constante hasta alcanzar un pico máximo, con una variación mayor (276mm – 383 mm) entre las estaciones consideradas. La estacionalidad de la precipitación en la región es muy importante, ya que de ella dependen ecosistemas relevantes como el bosque seco, así como la actividad agrícola, por lo que interrupciones en el comportamiento medio de la lluvia tienen un impacto importante sobre diversos sectores. La precipitación en esta zona está marcada por los contrastes en la cantidad de precipitación y sus impactos, ya que bajo condiciones extremas la región se ve afectada tanto por sequías como por inundaciones.

3.2. Temperatura.

La región Chorotega se caracteriza por altas temperaturas con una distribución espacial asociada con la elevación, ubicándose los valores promedios más bajos cerca de los sectores montañosos y los valores promedios más altos en las planicies (**Figura 8a**). La temperatura media más baja se localiza en la estación de Bagaces, la más cercana a la Cordillera Volcánica de Guanacaste, con valores cercanos a los 15°C. En el cantón de Santa Cruz se perciben

temperaturas promedio diarias de 24°C y en las cercanías de la planicie del Tempisque, las temperaturas medias son cercanas a los $25\text{-}27^{\circ}\text{C}$ durante el día.

El ciclo anual de las temperaturas máxima y mínima exhibe un comportamiento diferencial ligero entre las temperaturas durante la estación seca (más altas) y la estación lluviosa (más bajas), además de una oscilación en los valores durante la primera y segunda parte de la estación lluviosa, con temperaturas medias más bajas durante la primera parte de la estación lluviosa (**Figura 8b**). Un comportamiento diferente se observa en la estación de Hacienda Mojica, esta estación presenta un continuo descenso de la temperatura desde marzo hasta septiembre, luego del cual vuelve a aumentar. En la estación de Santa Cruz ocurre un comportamiento similar, pero el descenso continuado de la temperatura termina en julio y se mantiene constante durante los demás meses del año. Una oscilación más amplia durante la temporada lluviosa se observa en la estación de Finca La Ceiba, con picos mínimos durante los meses de mayo y septiembre.

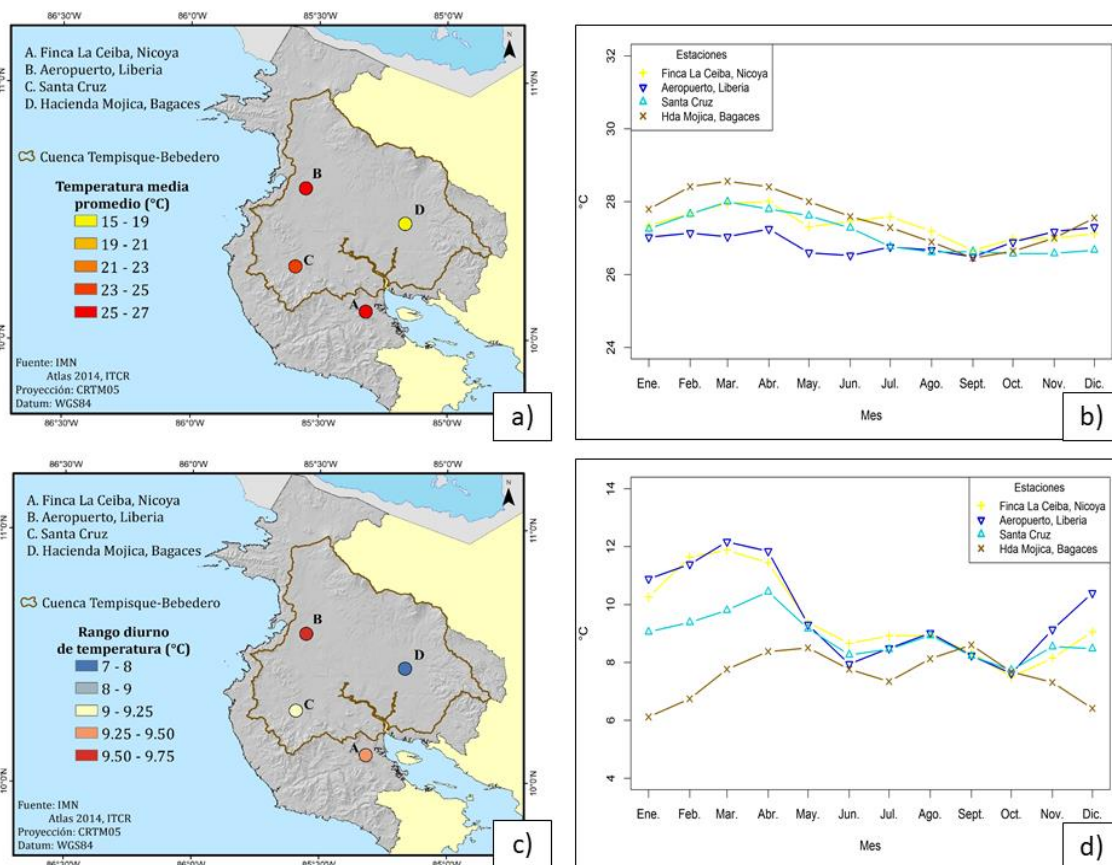


Figura 8. a) Temperatura media promedio y b) Ciclo anual de la temperatura media, para el período 1999 – 2019, basado en los datos observados de cada una de las estaciones meteorológicas. La distribución espacial se asocia con la elevación, los valores más altos se presentan durante la temporada seca. c) Rango diario de temperatura promedio y d) Ciclo anual del rango diario de temperatura, para el período 1999 – 2019, basado en los registros observados de cada una de las estaciones meteorológicas. La distribución espacial es similar al de la temperatura media, las máximas variaciones en temperatura entre el día y la noche se presentan durante la temporada seca y se asocian a la baja nubosidad.

Fuente: IMN. Elaboración propia.

Desde el punto de vista de la temperatura, la diferencia entre los valores máximo y mínimo durante el día, definido como el rango diurno de temperatura (RDT), es una característica importante de la región. Lo anterior debido a que similar a otras regiones con mayor aridez, hay una marcada diferencia de la temperatura entre el día y la noche. Esta diferencia de temperaturas se acentúa aún más durante el período seco, en el que los cielos despejados favorecen la salida de la radiación de onda larga y como resultado el enfriamiento de la superficie. El RDT es mayor en la estación Aeropuerto, Liberia (9.64°C), ligeramente más bajo cerca del Golfo de Nicoya (9.45°C), de 9°C en Santa Cruz y menor a los 8°C en Bagaces (**Figura 8c**). La diferencia existente a nivel mensual manifiesta una oscilación característica común; a partir de octubre, en la mayoría de las estaciones, se evidencia un incremento en las diferencias de temperatura diaria, hasta alcanzar el rango más amplio durante marzo o abril (**Figura 8d**), asociado con los cambios en la nubosidad. A partir del inicio de la temporada lluviosa se observa un descenso en las diferencias entre las temperaturas máxima y mínima, hasta junio o julio donde se vuelve a invertir para alcanzar un pico de gran amplitud en la temperatura diaria en agosto o septiembre. Esta característica de la temperatura en la región y sus variaciones a lo largo del día es de importancia ya que contribuye como un factor de estrés térmico con la capacidad de influenciar condiciones del ciclo de vida de las plantas, como es el caso de pérdida del follaje más rápido y temprana floración en comparación con sectores de menor temperatura (Fournier, 1969). Hacia el final del período se alcanzan las mayores diferencias la región con la floración de árboles como roble de sabana y jacaranda.

3.3. Evapotranspiración.

3.3.1 Comparación de los métodos de estimación de ET

La ET es uno de los componentes principales del balance hidrológico, su importancia reside en la interacción atmósfera-superficie por medio del transporte de flujos de aire y calor que hacen de la Tierra un sistema acoplado. La ETP es la tasa de humedad que la atmósfera demanda a la superficie la cual se supone tiene agua libre, es decir, está suplida por suficiente agua, por lo cual las limitaciones dependen de la energía disponible en el área de estudio. (Hidalgo et al., 2005).

La ET se estima a partir de métodos empíricos basados en consideraciones energéticas y ecuaciones con un enfoque físico. Existe diferencias importantes entre los métodos empíricos utilizados en función de las variables que incorporan, ya que las mismas representan a su vez diferentes componentes del balance de energía. No obstante, el uso de estas estimaciones se limita, por lo general, a la disponibilidad de información de las variables que cada método requiere (una descripción de algunos de los métodos se presenta en la **Tabla 2**).

En consideración de que la región se caracteriza por una estacionalidad marcada de la precipitación y por ende de la nubosidad, así como variaciones importantes de la temperatura, es importante determinar qué tan significativas pueden ser las diferencias de la ET estimada por los diferentes métodos.

Con base en los registros observados, se realizó la estimación de la ET utilizando dos distintos métodos para cuatro de las estaciones analizadas para la región Chorotega (**Figura 9**). En la región Chorotega, la característica más relevante es la marcada estacionalidad que diferencia la región de otras áreas del país al presentar una oscilación anual promedio particular que diferencia la época seca de los períodos con lluvia. De manera que los valores de ET que muestran una variabilidad intraestacional baja no capturan el comportamiento observado en la región.

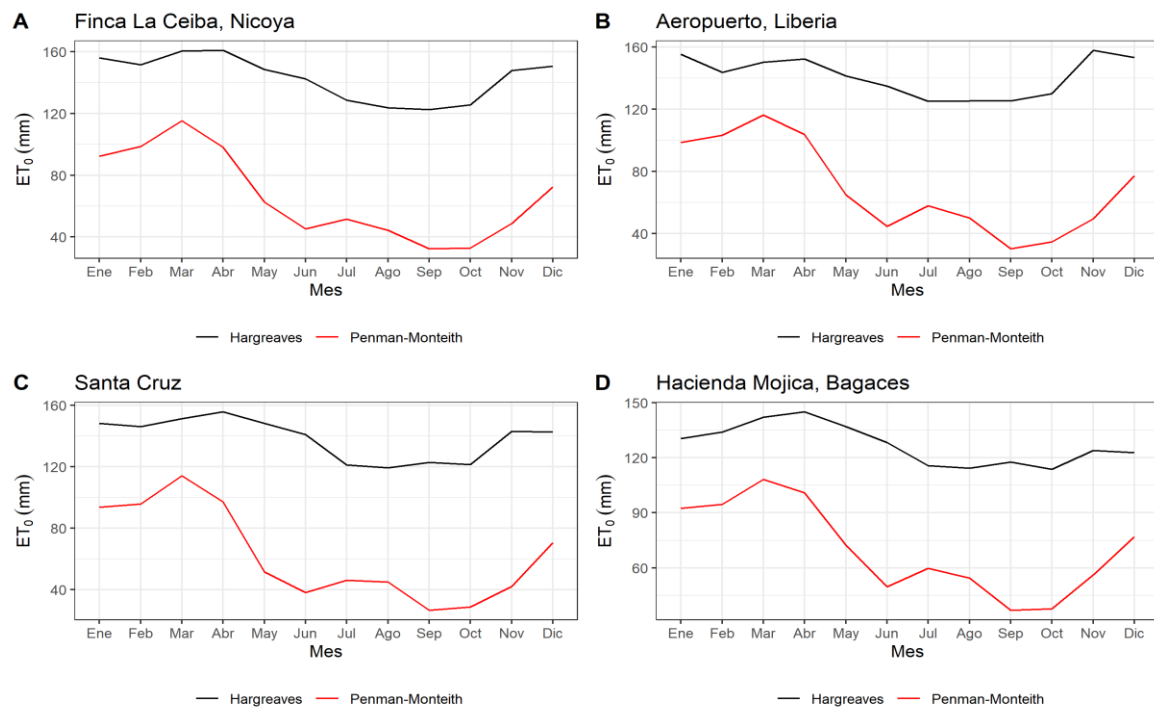


Figura 9. Comparación entre los promedios acumulados de ET₀ según las ecuaciones de Hargreaves (línea negra) y Penman-Monteith (línea roja) en las estaciones de: a) Finca la Ceiba, b) Aeropuerto Liberia, c) Santa Cruz y d) Hacienda Mojica. En todos los casos, la ecuación de Hargreaves sobreestima la ET₀ en relación con la ecuación de Penman-Monteith, esto debido a la omisión o sustitución de los valores de radiación con parámetros relacionados a la latitud. Elaboración propia.

La estimación de ET₀ basada en la ecuación de Hargreaves, presenta un comportamiento bimodal distintivo en todas las estaciones analizadas y por tanto refleja la variación estacional en el rango de temperatura para la región Pacífico norte de Costa Rica (mayor en la estación seca). Sin embargo, estima valores similares de ET₀ a lo largo del año, este resultado se asocia con el peso que tiene la información de la radiación en la estimación de ET₀. Los registros de larga data, por lo general, están limitados a información de temperatura y precipitación,

por lo que la implementación de estimaciones que incluyan explícitamente variables como el viento y la radiación no son factibles en muchos sitios. Por tal motivo, en ausencia de bases de datos con otras variables, se considera esta aproximación como razonable para tratarse de un cálculo bastante simple (Xu y Singh, 2001) y concordante con las condiciones climáticas locales (Trajkovic y Kolakovic, 2009).

Las desviaciones con respecto a valores más realistas forman parte de la simplicidad de la estimación y han sido previamente documentadas como una sobre o subestimación en regiones húmedas o secas respectivamente (Er-Raki et al., 2010). Teóricamente, en un ambiente con limitado suministro de agua, como es el caso de las regiones semiáridas, un incremento en la precipitación se asocia con: a) un aumento en el flujo de calor latente producto del aumento de la humedad en superficie, y b) un descenso de la radiación de onda corta debido a la nubosidad y humedad creciente (Donohue et al., 2010). Estos elementos marcan la existencia de un comportamiento diferencial entre la época seca y la época lluviosa para la que se tiene valores más bajos de ET. De manera que se reporta para la región Chorotega una alta sobreestimación de ET_0 utilizando los métodos empíricos (Hargreaves) respecto a la ecuación de Penman-Monteith que alcanza diferencias cercanas a los 100mm durante la época lluviosa. Esta diferencia es atribuible a la sustitución de información relativa a la radiación con la latitud, lo cual repercute en la omisión de las condiciones de nubosidad propias de la estación lluviosa, y por ende en las liberaciones de humedad a la atmósfera superiores a las que ocurren en circunstancias de mayor nubosidad, en que la humedad tiende a quedar atrapada en las capas más bajas de la atmósfera y cerca de la superficie.

Se señala que este tipo de diferencia se amplifica en otros productos como derivados de modelos que se basen en estimaciones satelitales para la radiación, ya que de no contar con una adecuada parametrización que represente la estacionalidad de la nubosidad, se puede inducir un error adicional. Esta observación es de importancia, ya que el aumento en el uso de productos de modelos numéricos disponibles en diversas plataformas debe realizarse de forma cuidadosa y tomar en cuenta estos aspectos. Más aún, considerando que muchos de estos productos se utilizan ampliamente para apoyar la toma de decisiones y planificación del sector agrícola, en el cual una estimación adecuada de ET es fundamental.

De acuerdo a estas diferencias, el uso de estimaciones basadas solo en temperatura no es recomendable en relación con los estudios de sequía dada la sobreestimación de las condiciones secas en superficie. De manera que se considera recomendable realizar esfuerzos por mejorar las capacidades observacionales en la zona y promover la integración de los registros meteorológicos más completo que incluyan la información del viento y la radiación neta.

La ecuación de Penman-Monteith ha demostrado su capacidad para capturar adecuadamente las tendencias en la ET_0 , con una estacionalidad asociada con el efecto combinado de cuatro variables consideradas en su formulación: temperatura media, radiación neta, presión de vapor y velocidad del viento; especialmente esta última, el albedo, y la radiación han demostrado jugar un papel clave en la dinámica de la evapotranspiración (Donohue et al., 2010; Hidalgo et al., 2005). Por este motivo, este estudio hará uso de la estimación de Penman-Monteith para garantizar la mejor representación de ET_0 dadas las características climatológicas de la región de estudio.

3.3.2 Evapotranspiración en la región Chorotega

Con el objetivo de determinar el comportamiento espacial de ET , se realiza la estimación a partir de la ecuación de Penman-Monteith, a cada una de las estaciones indicadas previamente. Los acumulados de ET_0 más bajos (de 600 a 700 mm anuales) se presentan en el sector suroeste, en la estación de Santa Cruz (**Figura 10a**). Cerca del Golfo de Nicoya y de Bagaces los estimados anuales son cercanos a los 830 mm, los valores más importantes se obtuvieron en la estación Aeropuerto, Liberia (1083 mm). Valores altos de ET_0 cercanos al distrito de riesgo son importante de reconocer ya que estos implican mayor demanda atmosférica y por tanto de agua, para el mantenimiento óptimo de las plantaciones mediante la irrigación (Fisher et al., 2011) y a través de una gestión integrada energía - agua - producción agrícola (Birkel et al., 2017).

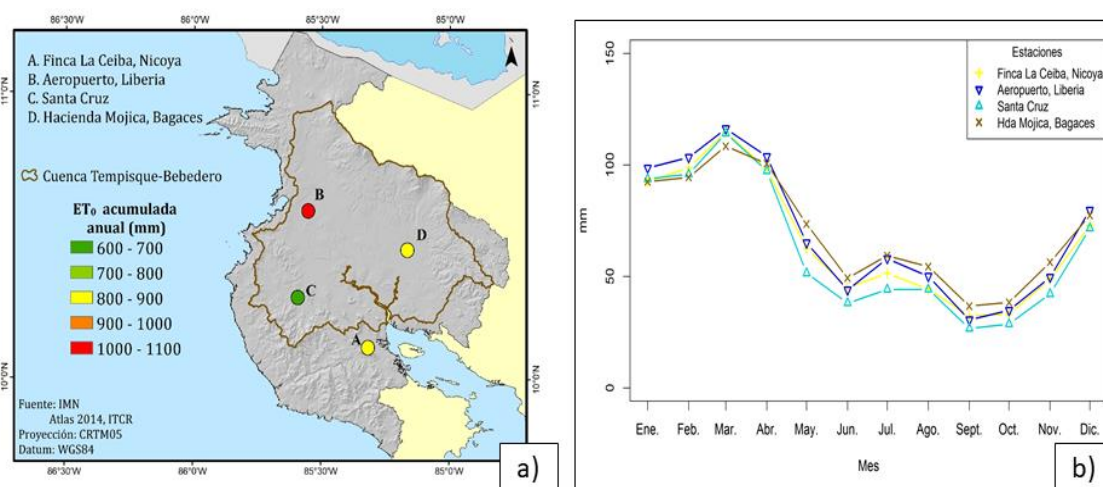


Figura 10. a) ET_0 acumulada promedio anual sobre la región Chorotega y b) Ciclo anual de la ET_0 , para el período 1999 – 2019, basado en los datos observados de cada una de las estaciones meteorológicas, de acuerdo a la ecuación de Penman-Monteith. La estación con los acumulados más altos se localiza en el sector de Liberia, se ve refleja la diferencia entre la temporada lluviosa (valores más bajos) y la seca (valores más altos) en relación con el ingreso de radiación y la nubosidad.

Fuente: IMN. Elaboración propia.

A lo largo del año se evidencia un comportamiento diferencial entre temporadas, como respuesta a los cambios estacionales en la disponibilidad de energía, así como la nubosidad existente. Durante los meses de noviembre a abril se identifican los máximos valores de ET_0 (**Figura 10b**), coincidente con la estación seca de la vertiente del Pacífico tropical. En la temporada lluviosa (mayo-noviembre), se reduce el potencial de evaporación de la atmósfera, en gran parte debido a la gran cobertura nubosa que dificulta el ingreso de la radiación solar, que en consecuencia reduce la energía necesaria para aumentar la cantidad de vapor de agua, con un ligero aumento cerca de julio asociado con la ocurrencia del “*veranillo*”.

Los valores más altos se estiman en marzo (~113 mm), a partir del cual se evidencia una reducción brusca en la ET_0 con un primer mínimo en el mes de junio (~44 mm), durante el “*veranillo*” se observa un aumento en la ET_0 luego del cual vuelve a descender hasta llegar al segundo mínimo en septiembre (~31mm), a partir del cual se retoma un ascenso continuo.

En el contexto de la dinámica de la sequía, la ET representa una variable clave para comprender mejor cómo el déficit de precipitación asociado a la sequía meteorológica se propaga en el sistema. Su importancia en el balance energético radica en la devolución de parte de la energía solar a la atmósfera en forma de flujo de calor latente y en la transferencia de las moléculas de agua al estado gaseoso para generar vapor de agua, principal gas de efecto invernadero, por lo cual la ET tiene influencia sobre la temperatura en superficie (Liu et al., 2014). Temperaturas más altas se traducen en aumento de la ET, lo cual puede resultar en reducción de humedad en el suelo y por ende en disminución de precipitaciones (Rind et al., 1990).

4. Eventos de sequía en el período observacional histórico

4.1. Sesgos en el conteo de eventos secos asociados con el método de estimación de ET

La identificación de la cantidad de eventos de sequía meteorológica se realizó con base en el SPI. Los resultados concuerdan para los cuatro sitios considerados (**Figura 11a**), con un promedio de 117 eventos secos identificados para el período de 1998-2019. Debido a que uno de los objetivos principales de este estudio es analizar la propagación de los eventos secos, es de interés realizar la identificación de los eventos de sequía agrícola. La estimación de sequía agrícola se basa en este caso en el uso del SPEI y requiere información de ET. Como se mostró anteriormente, la estimación de ET presenta sesgos en función del método utilizado. Se evaluó la influencia del método utilizado para la estimación de ET en la identificación de los eventos de sequía meteorológica. Con la estimación basada en la ET_0 calculada con la ecuación de Hargreaves (**Figura 11b**) se obtienen 102 eventos de sequía agrícola en el periodo 1998-2019 y muestra un patrón similar al de la sequía meteorológica antes mencionada. Al utilizar ET_0 estimada con el método de Penman-Monteith, el conteo de eventos de sequía agrícola es diferente para el mismo período (**Figura 11c**).

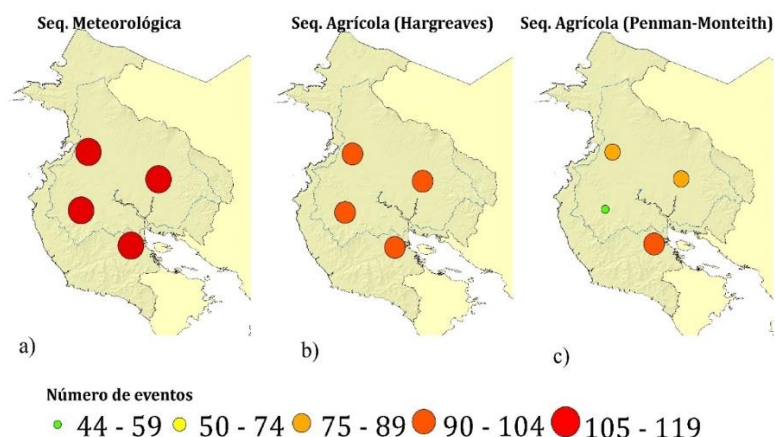


Figura 11. Conteo de eventos de sequía meteorológica (izquierda) basada en el SPI, y sequía agrícola basadas en el SPEI con datos de ET_0 estimada con la ecuación de Hargreaves (centro) y de Penman-Monteith (derecha) de 1998 al 2019. Se denota un comportamiento similar a la sequía meteorológica y sin diferencia entre las estaciones cuando se cuentan los eventos de sequía agrícola basados en la ET_0 de Hargreaves, de base energética.

Elaboración propia.

La cantidad de casos presenta una importante variación espacial que no es capturada por estimaciones en que la temperatura tiene un mayor peso. La estimación con base en el método de Penman-Monteith se considera más preciso ya que al incluir otros parámetros captura mejor la variabilidad espacial de las condiciones secas en la región Chorotega. En este caso, la cantidad de eventos de sequía agrícola es mayor en la zona del Golfo de Nicoya (92 eventos), de 79 y 89 en la estación del Aeropuerto Liberia y la Hacienda Mojica en Bagaces respectivamente.

Se observa que para la estación de Santa Cruz el número de eventos identificados es de 44, la mitad de la estimación obtenida utilizando Hargreaves en la estimación de ET_0 .

La similitud entre las estimaciones de sequía meteorológica para todas las estaciones se atribuye a la incapacidad del SPI para reconocer sequías relacionadas con el aumento de la demanda atmosférica, ya que solo considera la ausencia o reducción de la precipitación (Vicente-Serrano et al., 2014). Además, la distribución normal de los datos de lluvia que se realiza para el cálculo del SPI conduce a un registro similar en la frecuencia de los eventos secos para la misma región (Hayes et al., 1999). En áreas con regímenes de precipitación estacionales diferentes se debe tener mucho cuidado en la interpretación de los resultados, especialmente en áreas con una marcada estación seca como es el caso de la región Chorotega, ya que la metodología falla en estimar valores bajos de SPI bajo condiciones de alta probabilidad de períodos sin lluvia (Wu et al., 2007).

La estimación de sequía agrícola mediante el uso del SPEI sí es sensible a la demanda de la atmósfera y no se limita por el contenido de humedad en el suelo o la lluvia disponible (Vicente-Serrano et al., 2014). Las diferencias en las estimaciones de los eventos de sequía agrícola se relacionan con el método de ET mediante el cual se obtiene la métrica de balance hídrico. En áreas de menor precipitación, el método de estimación juega un papel clave en el balance hídrico, el SPEI se vuelve dependiente del descenso de las lluvias, mientras que en zonas húmedas depende de la magnitud de la disminución de la ET_0 (Beguería et al., 2014).

Este resultado reafirma las indicaciones sobre las limitaciones de las ecuaciones para la estimación de ET_0 con base energética en estudios de sequía, las cuales además tienen el potencial de influenciar las tendencias de largo plazo en las series del SPEI (Beguería et al., 2014). Además de que se aprecia una de las ventajas que presenta el uso de información precisa para la toma de decisiones y la determinación de los sectores más afectados. Desde el punto de vista de productores y tomadores de decisiones en manejo de recurso hídrico, la información más precisa de la estimación de los eventos es requerida. De esta manera, al poder representar mejor la variabilidad espacial del impacto de los eventos secos y su propagación, se puede atender mejor las necesidades específicas de las zonas en las que se presenta la mayor afectación.

A pesar de las ventajas o limitaciones antes presentadas, en muchas ocasiones no se cuenta con toda la información necesaria para una estimación robusta de la ET, por lo cual se debe recurrir a los métodos empíricos que necesitan menos datos de entrada, en cuyo caso se recomienda los índices de sequía que incluyan la temperatura. Lo anterior debido a que estudios anteriores han demostrado la influencia de esta variable en la severidad de los eventos secos, especialmente para escenarios futuros donde se proyectan aumentos globales de temperatura, siendo este el motivo por el cual la metodología general del SPEI se basa en la utilización de la ETP de Thornthwaite como entrada (Vicente-Serrano et al., 2010).

4.2. Identificación de eventos secos con SPEI

Para los componentes del sistema hidrológico es importante considerar la ET en la identificación de los eventos secos. Considerando los resultados del apartado anterior se utiliza la ET_0 de Penman-Monteith en la estimación del SPEI. En este caso se utilizan los valores de SPEI-12 y de las anomalías normalizadas de precipitación para identificar las sequías en cada una de las estaciones y visualizar la extensión temporal de las mismas.

Se destaca que, durante la primera mitad del período analizado, la mayoría de los valores de SPEI son de signo positivo o tienen índices de sequía con intensidades mucho más bajas que las estimadas a partir de 2009-2010 (**Figura 12**). La segunda mitad del período de estudio presenta SPEI negativos más intensos y persistentes, por lo cual es durante este período donde se observan sequías de mayor intensidad y mucho más largas. Este aspecto es importante ya que sugiere que en la última década la afectación por eventos secos ha sido mayor, en consistencia con los resultados de Hidalgo et al. (2019).

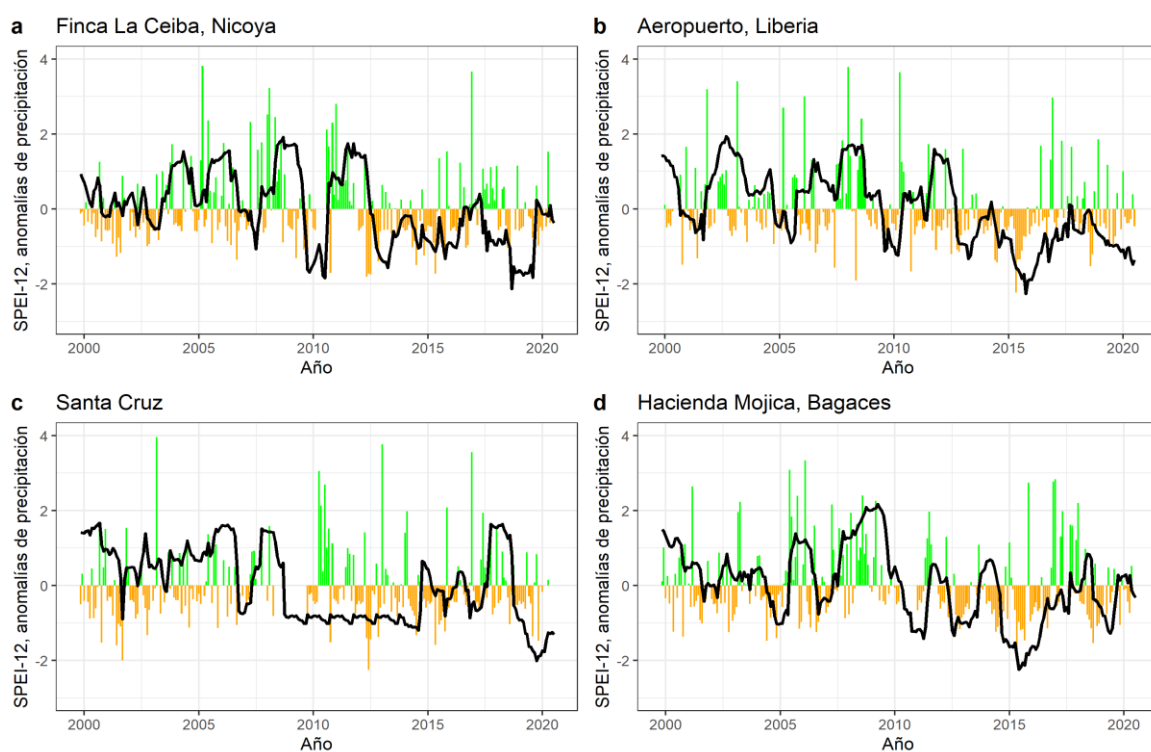


Figura 12. Eventos secos, de acuerdo a las anomalías de precipitación (barras) y el SPEI 12 (línea negra), para las estaciones de: a) Finca La Ceiba, Nicoya, b) Aeropuerto, Liberia, c) Santa Cruz y d) Hacienda Mojica, Bagaces. Se reconoce que la segunda mitad del período presenta los eventos de mayor magnitud y duración en todas las estaciones. Elaboración propia.

En la estación Finca La Ceiba, Nicoya, en los primeros años del período de estudio los valores negativos de SPEI son relativamente bajos (menores a -1); cerca del 2010 hay un cambio en el índice de sequía con un importante evento entre 2012-2015 (**Figura 12a**). El mayor déficit mensual se presenta en el mes de octubre (**Tabla 6**).

En Liberia, se nota una oscilación al principio del período caracterizada por eventos de sequías seguidos por valores altos de SPEI durante aproximadamente 3 años. A mediados del 2008 los eventos son más extensos especialmente entre 2014-2016 donde ambos indicadores están bajo cero (**Figura 12b**). El mayor déficit promedio es superior a los 146 mm y se presenta en octubre (**Tabla 6**). La estación Santa Cruz se caracteriza por valores negativos y SPEI cuasi constante a mitad del período (2009-2014), con variaciones en las anomalías de precipitación (**Figura 12c**). A diferencia de las demás estaciones durante los últimos años, especialmente 2018-2019, los valores de SPEI son mayoritariamente positivos. El déficit más grande es superior a los 148 mm en promedio y también se presenta en octubre (**Tabla 6**).

Tabla 6. Déficit promedio mensual

MES	FN LA CEIBA, NICOYA	AEROPUERTO, LIBERIA	SANTA CRUZ	HDA MOJICA, BAGACES
1	-1.17	-1.32	-2.96	-3.15
2	-4.19	-1.28	-1.70	-3.48
3	-4.83	-1.80	-2.72	-6.54
4	-20.89	-29.80	-16.18	-14.78
5	-86.93	-83.92	-127.67	-91.94
6	-65.57	-67.41	-62.00	-74.03
7	-88.21	-61.26	-86.32	-34.96
8	-105.06	-84.54	-23.98	-63.47
9	-68.13	-109.96	-84.33	-98.39
10	-129.76	-146.41	-148.14	-88.21
11	-58.35	-38.21	-61.17	-38.24
12	-14.76	-10.67	-10.97	-11.61

Promedio mensual del déficit de precipitación durante los eventos secos, estimado con base a la climatología del ciclo anual de lluvia en cada estación particular.

Elaboración propia.

En la estación Hacienda Mojica, Bagaces, también hay un comportamiento diferencial entre la primera mitad (mayormente valores positivos de SPEI) y la segunda mitad (más seco) del período de análisis (**Figura 12d**), el evento más largo se observa entre 2012-2013. El mes con mayor déficit en esta estación es septiembre, y es de menor magnitud que en las demás estaciones, 98 mm en promedio (**Tabla 6**).

La mayor cantidad de eventos, así como los de mayor duración se registran hacia la segunda mitad de la última década. Se resalta que los eventos de mayor duración se caracterizan por un marcado déficit durante la segunda mitad del año (meses de setiembre y octubre). Esto refleja la influencia que tiene para la propagación de las condiciones secas la disminución en los sistemas de gran escala que aportan precipitación a la región y que caracterizan el ciclo

anual de precipitación (Calvo-Solano et al., 2018). Este aspecto es importante, ya que sugiere que el desarrollo de las condiciones de sequía en la región Chorotega (así como el Corredor Seco Centroamericano en general) obedece a cambios en la circulación de gran escala (**Figura 13**).

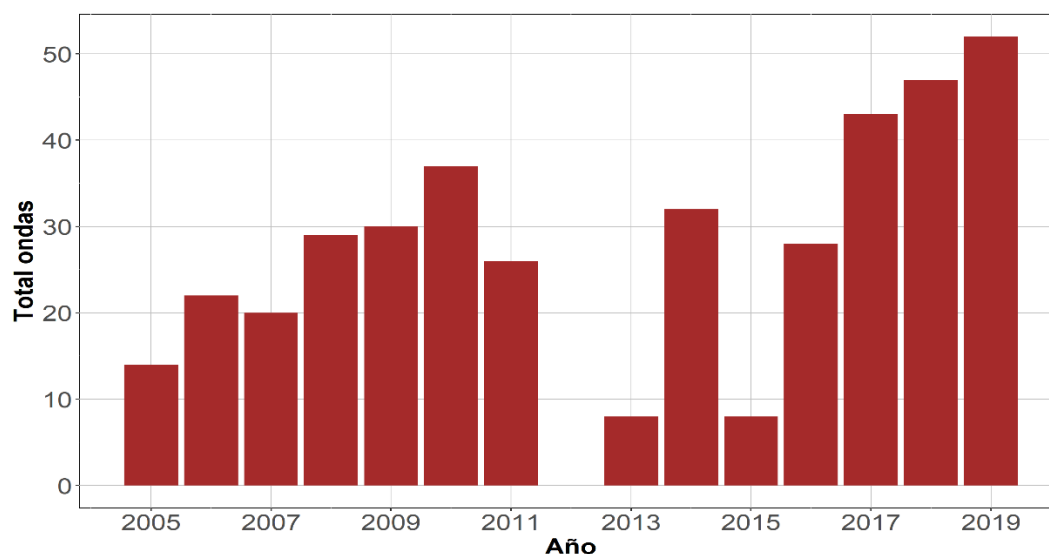


Figura 13. Total de ondas tropicales por año de acuerdo a los boletines meteorológicos mensuales emitidos desde el 2005.

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Elaboración propia.

4.3. Condiciones de aridez.

La aridez puede ser utilizada como un indicativo de la disponibilidad de agua, por cuanto establece una relación entre la cantidad de precipitación y la ET de un ecosistema, de esta forma determina si la lluvia es mayor o menor que la cantidad de vapor de agua que se evapora desde el suelo y se transpira desde la vegetación (Maliva y Missimer, 2012). En un ecosistema limitado por el agua conocer la aridez es importante para evaluar los riesgos hacia los sectores agroproductivos y determinar las gestiones adecuadas a cada cultivo y para cada región específica.

El estimado de aridez producto del cálculo P/ETP , indica que existe una variabilidad representativa de la lluvia en la región, siendo durante los años con mayor registro de precipitación durante los cuales se presenta un rango más amplio de variación (**Figura 14**). En las estaciones Aeropuerto, Liberia y Hacienda Mojica los estimados de aridez anual durante todo el período fueron menores a los 2.5, con un comportamiento similar en los años con los mayores o menores estimados como el 2008 y el 2015 respectivamente.

En Finca La Ceiba y la estación Santa Cruz, la aridez estimada es 5 o inferior en la mayoría de los años, con excepción de los años 2010 y 2011 en la estación Finca La Ceiba y del 2013 en Santa Cruz; este último es atribuible a la faltante de registros y por tanto menores acumulados estimados de ETP.

La aridez en función de su definición tiene la misma sensibilidad a las estimaciones de la ET y por consiguiente guarda una estrecha relación con el SPEI ya que ambas son variables dependientes de la temperatura y la precipitación. No obstante, la aridez tiene una respuesta desfasada a los cambios en dichas variables, ya que debido a la inercia térmica del sistema hay un período de ajuste entre los cambios en la aridez y los cambios entre la temperatura y la precipitación.

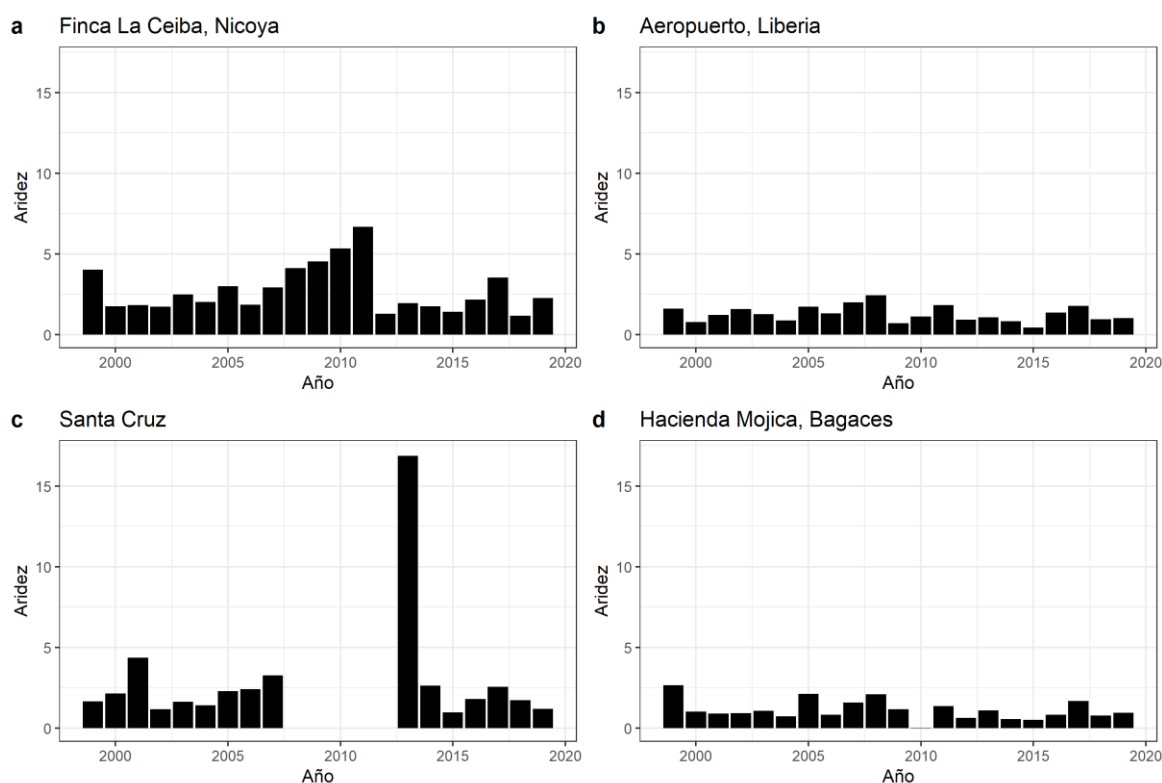


Figura 14. Aridez anual estimada como relación de la precipitación entre la ET_0 según Hargreaves en: a) Finca La Ceiba, Nicoya; b) Aeropuerto, Liberia; c) Santa Cruz; y d) Hacienda Mojica, Bagaces. Elaboración propia.

La aridez y su opuesto, la humedad, se asocian con las condiciones climáticas locales y por tanto se reconocen como elementos del ecosistema asociados a la vegetación (Maliva y Missimer, 2012), de ahí que una de las clasificaciones más comunes sean zonas áridas o zonas húmedas. En determinados casos se consideran los cambios en la climatología y por ende en la aridez, para favorecer el crecimiento de los cultivos.

Teóricamente, un limitado suministro de humedad resulta en estrés hídrico y cambios en la fotosíntesis y en la salud de las plantas, lo que hipotéticamente debería ser registrado mediante el NDVI (Cooley et al., 2018).

La correlación estimada entre las series de las anomalías de aridez y el NDVI obtuvo valores significativos (95%) para las estaciones Aeropuerto, Liberia y Hacienda Mojica, ambas superiores a los 0.7 (**Tabla 7**). Al realizar el cálculo para cada mes no se obtuvieron correlaciones significativas en la estación Finca La Ceiba, lo mismo que para la Hacienda Mojica. En la estación Aeropuerto, prácticamente durante toda la temporada lluviosa se obtuvieron correlaciones de moderada significancia, mientras que para la estación de Santa Cruz las correlaciones significativas se estimaron en los meses de julio, septiembre, octubre y diciembre.

Tabla 7. Correlación entre las anomalías de aridez y el NDVI

Mes/Estación	Finca La Ceiba	Aeropuerto	Santa Cruz	Hacienda Mojica
Enero	0.09	-0.18	-0.01	0.32
Febrero	0.02	0.28	0.00	0.33
Marzo	-0.05	0.38	0.19	-0.03
Abril	0.35	0.57	0.33	0.37
Mayo	-0.06	0.44	0.24	0.37
Junio	-0.03	0.41	0.23	0.20
Julio	-0.09	0.55	0.42	0.36
Agosto	0.01	0.46	0.18	0.25
Septiembre	0.03	0.30	0.41	-0.16
Octubre	-0.06	0.25	-0.44	-0.39
Noviembre	0.08	0.14	-0.17	0.28
Diciembre	-0.36	0.12	-0.40	0.10
Serie Completa	0.36	0.71	0.39	0.75

Correlación mensual y general entre las anomalías estandarizadas de aridez y el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) según la fórmula de Spearman. Los valores resaltados en rojo indican significancia al 95%. Se indica que, si bien la aridez es un concepto anual, en este caso fue estimada en escala mensual con el objeto de evaluar si condiciones de pérdida de humedad estacionales podrían estar relacionadas con el comportamiento de la vegetación.

Elaboración propia.

Dos de las principales causas de aridez (altas presiones y vientos continentales) mencionados por Maliva y Missimer (2012) no se experimentan en la región Chorotega, pero, presentan un fuerte impacto del mecanismo local llamado “*efecto sombra de lluvia*”, que está asociado con la topografía y el ascenso y posterior enfriamiento de las masas de aire con fuertes (reducidas) precipitaciones en barlovento (sotavento) que influye en la aridez de la zona (Maliva y Missimer, 2012). Tampoco se experimenta la influencia de las corrientes costeras frías, aunque los vientos del este, especialmente durante los máximos del Jet de Bajo Nivel

del Caribe (Amador, 2008) contribuyen con surgencia en la costa del Pacífico Norte. Durante los períodos de intensificación del Jet de Papagayo ocurre un efecto local de inversión de temperatura que inhibe el ascenso del aire e influye en la disminución de las lluvias.

4.4. Relación entre el comportamiento de las condiciones secas y la vegetación.

La ausencia o limitación del contenido de agua de un ecosistema, provoca un estrés en la vegetación que afecta la salud de la planta en términos fisiológicos (cambios en el proceso fotosintético) y biofísicos con la posible incidencia en la transpiración de la planta. (Cooley et al., 2018). Como índices representativos a dichas afectaciones, el NDVI y el SPEI, se utilizan para analizar las condiciones de la vegetación y las alteraciones correspondientes a los eventos secos.

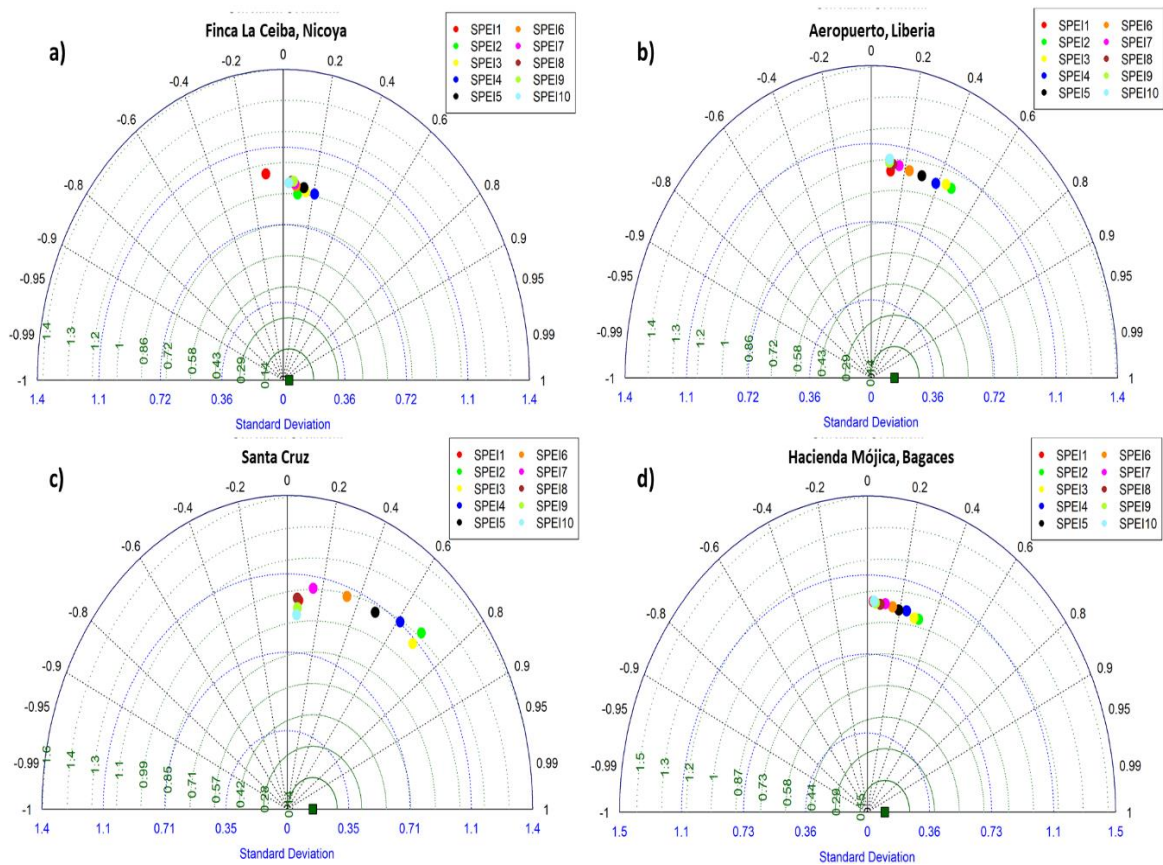


Figura 15. Diagrama de Taylor representativo de la correlación entre el NDVI (MODIS-TERRA) y el SPEI en diferentes escalas para las estaciones de: a) Finca La Ceiba, Nicoya; b) Aeropuerto, Liberia; c) Santa Cruz; y d) Hacienda Mojica, Bagaces.

Elaboración propia.

Como se muestra en los diagramas de Taylor de la **Figura 15**, la respuesta de la vegetación a la sequía no es uniforme en la región Chorotega, la superficie juega un papel determinante en la caracterización de las condiciones secas. Además, la actividad agrícola afecta la identificación de la sequía. Solamente las estaciones de Liberia y Santa Cruz muestran una

relación entre el NDVI y el SPEI, especialmente con el SPEI 2 (**Figura 15b** y c), lo que sugiere un desfase de hasta meses entre el déficit de lluvia y la respuesta de la vegetación a este déficit.

Hay varias razones que permiten explicar las diferencias en la respuesta espacial de la vegetación a los cambios en la precipitación y se asocian con el uso del suelo. En condiciones en las que hay riego en las fincas, resulta muy difícil identificar respuestas a la sequía, debido a que el riego enmascara el efecto del déficit hídrico. Además, las diferencias en el tipo de suelo inciden directamente sobre la capacidad del mismo para filtrar y almacenar agua, por lo que es esperable que no toda la región presente una respuesta homogénea.

El tipo de vegetación dominante es un elemento importante, ya que no todas las plantas tienen la misma tolerancia a las condiciones secas. Plantas características de climas semiáridos y secos, como por ejemplo las que se ubican en el bosque tropical seco, tienen una mayor resiliencia ante eventos secos, por lo que su respuesta a la propagación de las condiciones secas difiere de plantas provenientes de regiones más húmedas. Se menciona de este modo, que la respuesta de la cobertura vegetal de una región al desarrollo de eventos secos está estrechamente relacionada con las actividades productivas que se desarrollan en la zona, así como de la intervención antropogénica. Esto representa un reto importante, ya que la actividad antropogénica no está, generalmente, considerada de forma explícita en los estudios climatológicos lo que añade incertidumbre a la interpretación de la respuesta de la vegetación a los cambios en la aridez. Desde un punto de vista simplificado, la respuesta fisiológica de la vegetación a un aumento de la aridez va a tener dos componentes principales: a) estrés térmico y b) estrés hídrico.

5. Impacto de los modos de variabilidad interanual sobre los eventos secos

5.1. ENOS

La región Chorotega ha demostrado su susceptibilidad al fenómeno ENOS y los efectos atmosféricos asociados (Cooley et al., 2018) como son las inundaciones y las sequías. A nivel mensual se destaca el trimestre ASO (agosto, septiembre y octubre) por la mayor cantidad de correlaciones significativas ($|p| < 0.05$) entre las anomalías de precipitación y el índice MEI (**Tabla 8**), todas con valores negativos bajos (-0.6 a -0.4), moderados (-0.8 a -0.6) y valores altos (-1 a -0.8). Durante el mes de julio se obtuvieron varias estaciones con correlaciones negativas bajas y una correlación significativa baja de valor positivo en Filadelfia (0.51). La correlación más alta se obtuvo en agosto en la estación Hacienda Mojica en Bagaces. En los demás meses lluviosos solo se obtuvieron correlaciones significativas bajas y en el mes de transición (noviembre) la correlación no fue significativa.

Tabla 8. Correlación entre las anomalías de precipitación y el MEI

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Nicoya Extensión Agrícola	-0.10	0.07	0.21	-0.10	-0.13	-0.31	-0.34	-0.64	-0.55	-0.50	-0.11	0.06
Llano Grande, Liberia	-0.21	-0.21	0.39	-0.09	-0.33	-0.10	-0.48	-0.61	-0.52	-0.42	-0.10	-0.18
Bagaces	-0.29	-0.06	0.06	0.31	-0.22	0.14	-0.27	-0.33	-0.19	-0.17	-0.10	-0.05
Cañas	0.00	-0.33	0.51	0.23	-0.17	-0.03	-0.59	-0.69	-0.35	-0.41	0.28	0.20
Finca La Ceiba, Nicoya	-0.33	-0.19	-0.23	-0.25	-0.47	0.21	0.01	-0.75	-0.38	-0.40	-0.15	-0.04
Aeropuerto, Liberia	-0.35	-0.33	0.32	0.07	0.19	-0.15	-0.41	-0.51	-0.47	-0.35	0.02	-0.15
Santa Cruz	-0.03	-0.04	0.24	-0.01	-0.14	-0.14	-0.20	-0.59	-0.45	-0.51	-0.04	-0.17
Hda. Mojica, Bagaces	-0.08	-0.56	0.26	-0.11	-0.28	-0.26	-0.29	-0.83	-0.63	-0.46	0.05	-0.42
La Guinea, Filadelfia	-0.33	-0.14	0.40	0.00	-0.26	0.13	-0.30	-0.64	-0.51	-0.39	-0.27	-0.22
Ingenio Taboga, Cañas	-0.14	-0.25	0.26	0.13	-0.15	-0.42	-0.49	-0.76	-0.52	-0.61	0.02	0.21
P.N. Santa Rosa	-0.50	-0.41	0.34	-0.22	-0.26	-0.41	-0.45	-0.54	-0.42	-0.33	0.08	-0.06
Murciélago	-0.37	-0.19	0.28	0.47	0.02	-0.09	-0.52	-0.07	0.08	-0.05	0.04	-0.05
Filadelfia	-0.21	-0.30	0.08	-0.01	0.14	0.03	0.51	0.37	-0.13	0.00	-0.17	-0.45
Pelón de la Bajura	0.17	0.10	0.15	0.00	-0.24	-0.07	-0.26	-0.60	-0.54	-0.29	-0.14	0.02
Finca Las Huacas	-0.12	0.23	0.23	0.21	-0.43	-0.15	-0.46	-0.72	-0.55	-0.44	0.10	0.00
Hda. Mojica	-0.42	-0.36	-0.35	-0.02	0.09	0.09	0.23	-0.01	0.24	0.04	0.09	0.00

Correlación mensual entre las anomalías estandarizadas de precipitación y el Índice Multivariado del ENOS (MEI) según la fórmula de Spearman. Los valores resaltados en rojo indican significancia al 95%.

Elaboración propia.

Para el inicio de la temporada seca, en diciembre, solo se determinaron dos estaciones con correlación significativa inversa, las cuales se ubican en el centro de la cuenca Tempisque – Bebedero (**Figura 16**). Mientras que, en enero, se destaca la estación del Parque Nacional Santa Rosa con un valor de correlación de -0.50 y la Hacienda Mojica (-0.42), valores similares se obtuvieron en febrero para ambos puntos. Marzo y abril se destacan por, en contraposición con los demás meses, contener estaciones con correlaciones positivas ($r > 0.4$), en la Península de Santa Elena y al sur de la cuenca del Tempisque – Bebedero.

Las correlaciones negativas significativas moderadas y altas determinadas durante los meses lluviosos se concentran en la cercanía de la desembocadura del Tempisque y del Golfo de Nicoya, y de baja significancia al noroeste de la región Chorotega.

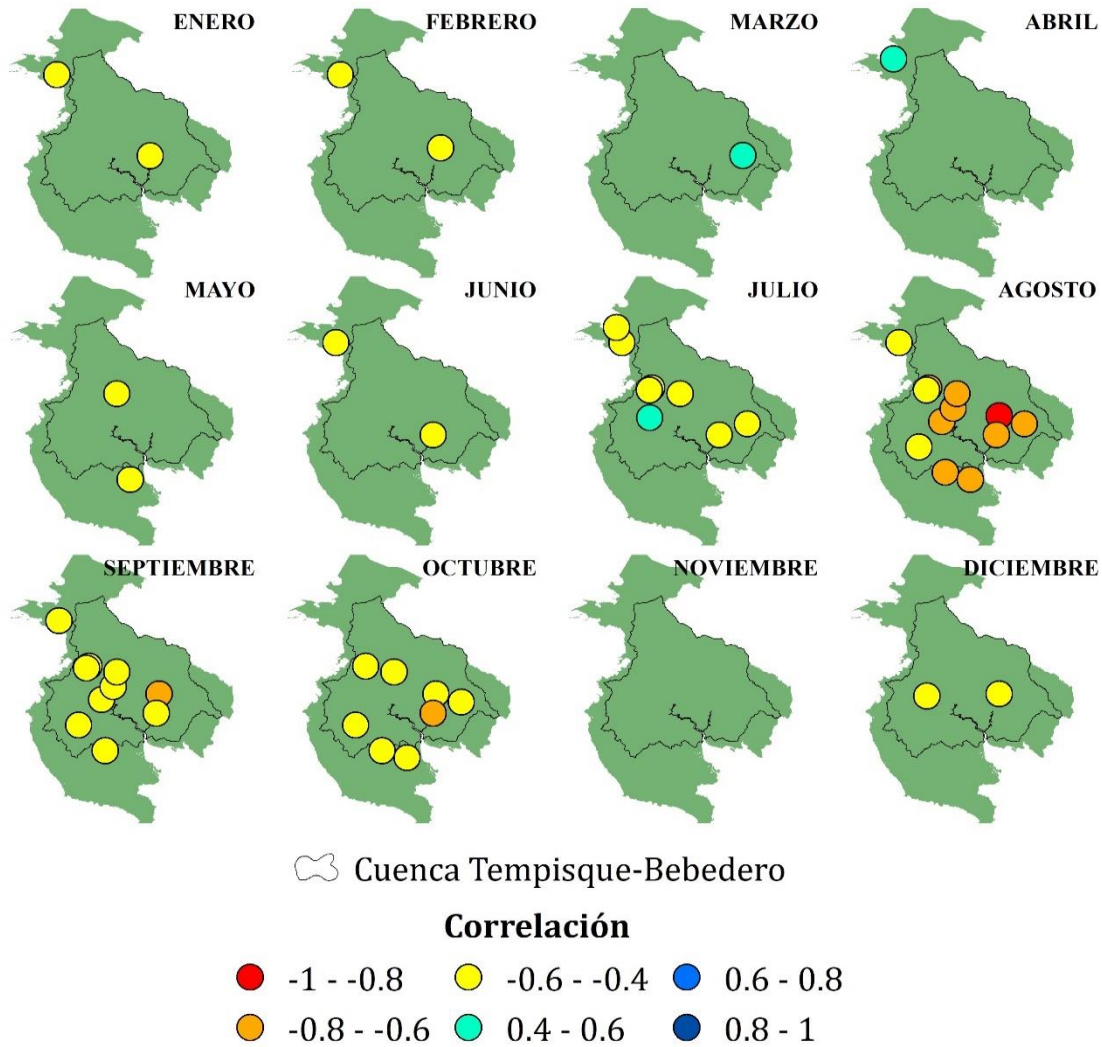


Figura 16. Correlación mensual entre las anomalías estandarizadas de precipitación y el Índice Multivariado del ENOS (MEI) por estación según la fórmula de Spearman. Todas las correlaciones obtenidas son de baja o moderada significancia, exceptuando la correlación en agosto en Hacienda Mojica, Bagaces. Y en su gran mayoría son de signo negativo, a excepción de los meses de marzo, abril y una estación en julio. Elaboración propia.

La fase cálida del ENOS ocasiona un calentamiento de las aguas del Océano Pacífico Ecuatorial, alteraciones en la presión atmosférica y la circulación del viento a nivel global, en Centroamérica se asocia con una disminución de las precipitaciones sobre la vertiente Pacífica (Bonilla, 2014). Para Costa Rica representa períodos secos prolongados con afectaciones importantes sobre el sector agrícola y forestal, en la región Chorotega el 90% de las sequías anteriores a 1997 se asociaron con la fase El Niño (Villalobos et al., 1997).

A pesar de que se ha reconocido la influencia del ENOS sobre las condiciones normales de precipitación y temperatura, también se reconoce que no todos los eventos de El Niño han ocasionado una sequía (Villalobos, 1999), ya que el ENOS no es el único fenómeno que repercute sobre la climatología (Muñoz Jiménez, 2019). La relación entre el ENOS y los eventos secos se restringe a unos pocos meses, lo cual indica que las sequías más largas están influenciadas por la respuesta hidrológica y las condiciones secas previas. (Vicente-Serrano et al., 2010). Es aún más difícil determinar el efecto ENOS sobre los diferentes tipos de sequía (agrícola, hidrológica) dado el rezago en la respuesta de la vegetación y el sistema subterráneo a la disminución de las precipitaciones, así como la escasa cantidad de información sobre la vegetación en escala local.

5.2. PDO

La asociación mensual entre las oscilaciones de lluvia y el PDO, resultó en correlaciones bajas y poco significativas (**Tabla 9**). Durante la temporada seca, solo se obtuvieron correlaciones significativas (bajas) en diciembre (-0.56 en Filadelfia) y en marzo, con 3 estaciones: en el Parque Nacional Santa Rosa, en Cañas y en la Hacienda Mojica.

Tabla 9. Correlación entre las anomalías de precipitación y el PDO

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Nicoya Extensión Agrícola	0.08	0.12	0.28	-0.13	0.01	0.20	0.01	-0.23	-0.09	-0.27	-0.14	-0.11
Llano Grande, Liberia	0.09	-0.07	0.40	-0.12	0.09	0.19	-0.08	-0.39	-0.01	-0.18	-0.25	-0.20
Bagaces	-0.02	0.20	0.20	0.29	0.05	0.40	0.13	-0.04	0.03	-0.14	-0.32	-0.15
Cañas	0.09	0.01	0.51	0.00	0.11	0.10	-0.16	-0.46	-0.14	-0.35	-0.03	0.09
Finca La Ceiba, Nicoya	-0.20	-0.05	-0.14	-0.05	-0.21	0.50	0.15	-0.27	-0.27	-0.42	-0.13	0.03
Aeropuerto, Liberia	-0.13	-0.12	0.24	-0.02	0.22	-0.14	-0.18	-0.34	-0.24	-0.35	-0.12	0.05
Santa Cruz	-0.18	0.08	0.21	-0.06	0.11	0.08	-0.07	-0.32	-0.01	-0.28	-0.20	-0.23
Hda. Mojica, Bagaces	0.30	-0.26	0.44	-0.07	-0.15	-0.02	-0.23	-0.43	-0.31	-0.33	0.20	-0.19
La Guinea, Filadelfia	-0.16	0.24	0.37	-0.02	-0.09	0.32	0.05	-0.37	-0.19	-0.16	-0.32	-0.15
Ingenio Taboga, Cañas	-0.05	0.02	0.26	0.08	-0.16	0.18	0.06	-0.40	-0.51	-0.45	-0.16	-0.02
P.N. Santa Rosa	-0.25	-0.06	0.43	-0.23	-0.30	0.14	0.12	-0.28	-0.17	-0.11	-0.10	0.03
Murciélago	-0.43	-0.20	0.38	0.25	-0.12	-0.10	0.04	0.09	0.22	0.02	-0.13	0.00
Filadelfia	-0.04	-0.21	0.00	-0.02	0.24	-0.31	0.11	0.11	-0.18	0.11	-0.25	-0.56
Pelón de la Bajura	-0.14	-0.07	0.25	0.01	-0.16	0.35	0.04	-0.32	-0.21	0.06	-0.14	-0.04
Finca Las Huacas	0.12	0.14	0.31	0.26	-0.11	0.17	-0.11	-0.47	-0.10	-0.40	-0.27	0.15
Hda. Mojica	0.22	0.11	0.27	0.22	-0.21	-0.05	0.26	0.23	-0.08	-0.21	-0.02	0.00

Correlación mensual entre las anomalías estandarizadas de precipitación y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) según la fórmula de Spearman. Los valores resaltados en rojo indican significancia al 95%.

Elaboración propia.

Durante la primera mitad de la temporada lluviosa, solo en junio se obtuvo una correlación de baja significancia ($|p| < 0.05$) en Nicoya (**Figura 17**). Las correlaciones obtenidas en la segunda mitad de la época lluviosa son en agosto, que se destaca por el ser el mes con el mayor número de estaciones con correlaciones, y en septiembre con 3 estaciones, durante ambos meses, todas las correlaciones se localizan en la desembocadura del Tempisque-Bebedero y sobre el Golfo de Nicoya.

En general, los resultados sugieren una respuesta similar de la precipitación ante el ENOS y la PDO, excepto durante el mes de agosto en que un número importante de estaciones muestra una correlación opuesta (aumento en la precipitación bajo condiciones de PDO). Este comportamiento se observa para las estaciones con mayor cercanía a la costa, así como el interior de la cuenca Tempisque-Bebedero. En primera instancia este resultado es confuso, ya que con base en el patrón de circulación de gran escala el resultado esperado es una respuesta similar a PDO y ENSO.

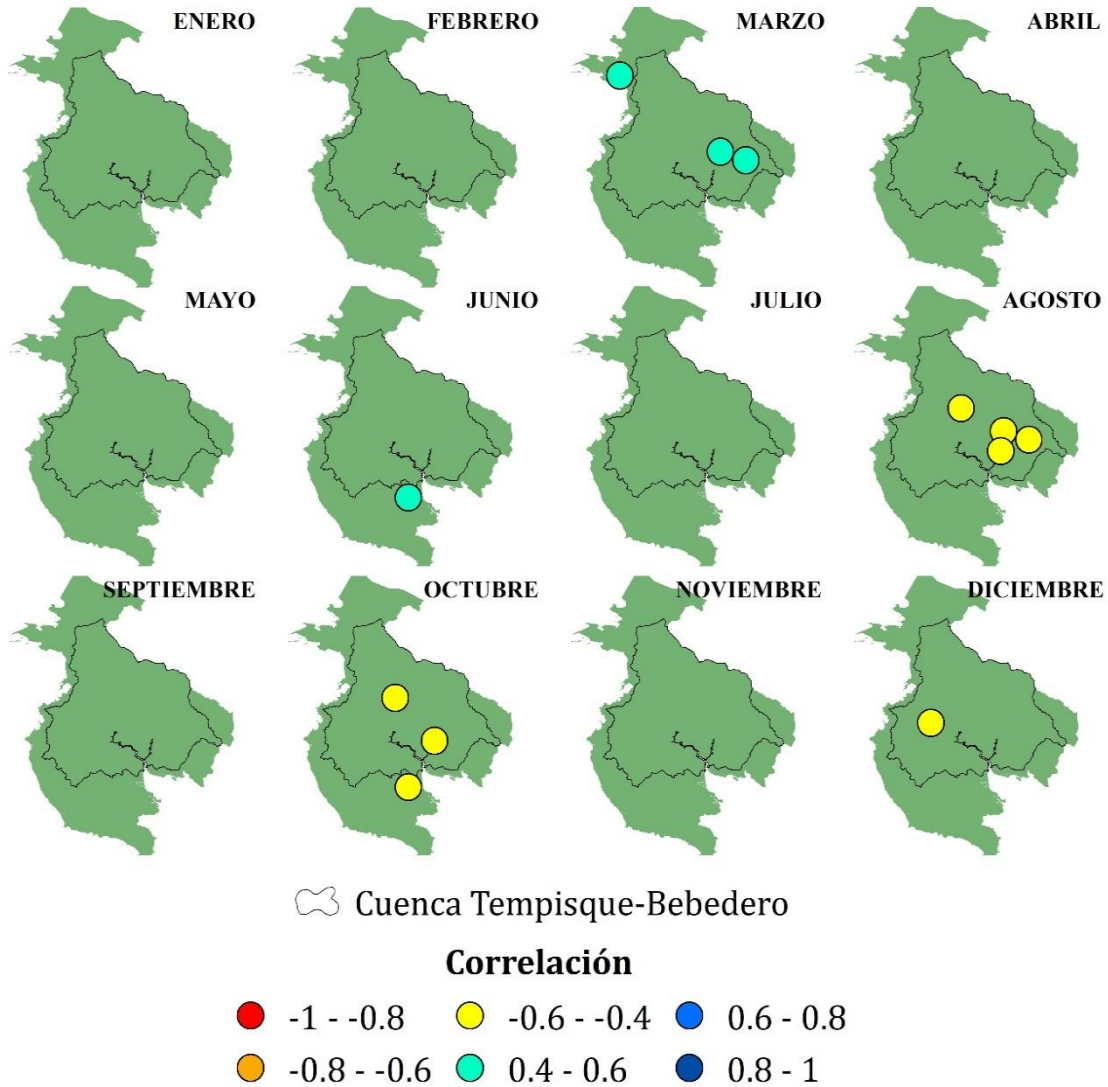


Figura 17. Correlación mensual entre las anomalías estandarizadas de precipitación y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) por estación, según la fórmula de Spearman. Todas las correlaciones obtenidas son de baja significancia, pero durante marzo y junio son de signo positivo, mientras que en agosto, septiembre y diciembre son correlaciones negativas. Elaboración propia.

En las dos estaciones ubicadas en Cañas, se denota que durante los agostos donde se obtuvo valores positivos de ambos modos de variabilidad (PDO y ENSO) se estimaron anomalías negativas de precipitación (**Figura 18**), esto es fácilmente observado en el año 1997 cuando la estación de Ingenio Taboga registra la anomalía negativa más alta (**Figura 18c**) y se obtuvo la segunda anomalía negativa de lluvia más importante en la estación de Cañas (**Figura 18a**). Relaciones similares en el sentido inverso se obtuvieron en ambas estaciones del distrito de Cañas, obteniéndose anomalías positivas de gran intensidad durante aquellos agostos en los cuales los modos de variabilidad presentaron los picos negativos más altos, especialmente el MEI (línea roja continua).

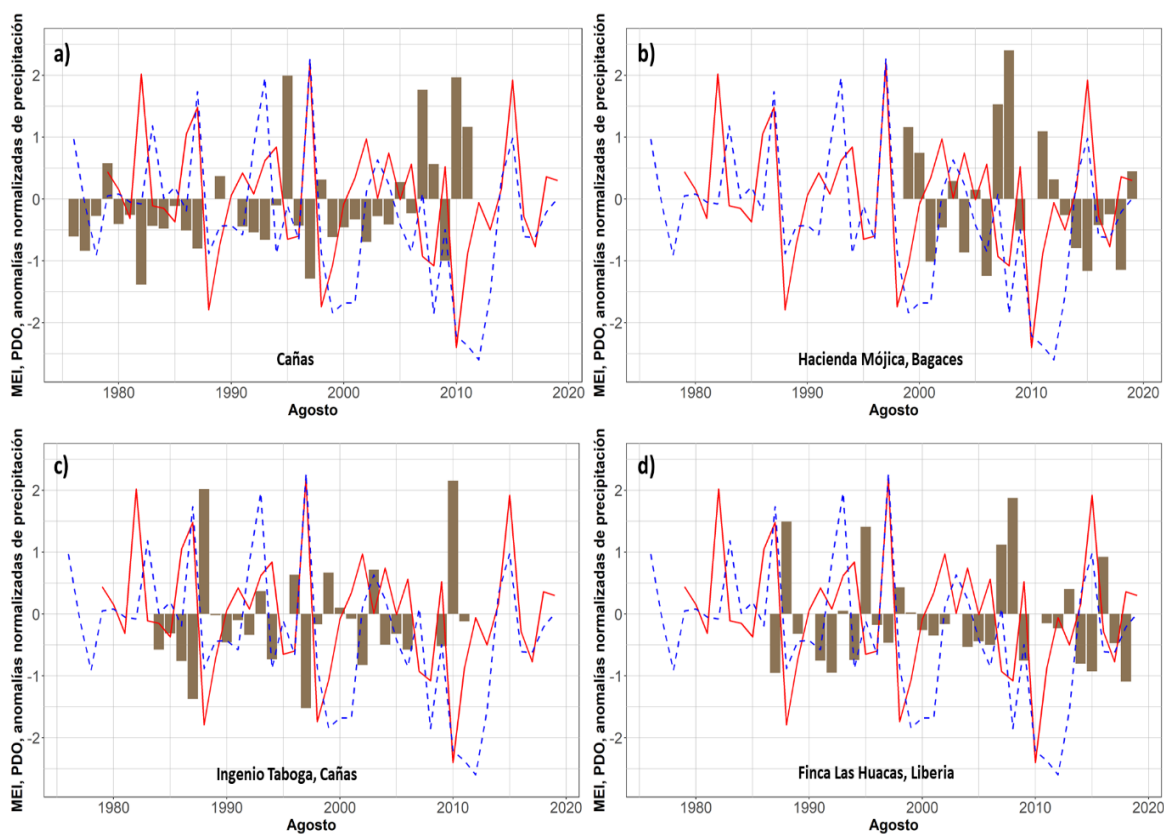


Figura 18. Gráfico representativo de la correlación durante los meses de agosto entre las anomalías de precipitación (barras) y los índices del MEI (línea roja), y del PDO (línea azul punteada) para las estaciones de: a) Cañas; b) Hacienda Mójica, Bagaces; c) Ingenio Taboga, Cañas; y d) Finca Las Huacas, Liberia. Elaboración propia.

Las estaciones de Hacienda Mójica y Finca Las Huacas presentan un comportamiento similar, aunque de menor magnitud, entre las anomalías de lluvia y los modos de variabilidad (**Figura 18b** y **d**), en ninguna de ellas se obtuvo una respuesta a la correlación lineal entre los índices PDO y MEI en agosto de 1997. En ambas estaciones se puede destacar los años 2007 y 2008 durante los cuales en ambas localidades se presentaron anomalías importantes positivas de lluvia, lo cual no ocurrió en agostos anteriores o posteriores durante los cuales los modos de variabilidad obtuvieron picos más altos.

6. Evaluación de la intensificación de la sequía y modelo de partición

6.1. Evaluación de la intensificación de la sequía

La propagación de la sequía, es decir, la transición de sequía meteorológica a sequía hidrológica (Miralles et al., 2019), está influenciada por las características de la cuenca y por las condiciones climáticas (Van Loon y Van Lanen, 2012). Estas características incluyen las altas temperaturas, vientos fuertes, y baja humedad relativa (Pendergrass et al., 2020). Van Loon et al. (2012) reconocieron el papel especial que juega la estacionalidad de la precipitación (Van Loon et al., 2012), y la importancia de reconocer la influencia de la aridez y el tiempo de la precipitación respecto a la ETP en este proceso (Apurv et al., 2017). El momento en que ocurren y la abundancia de las lluvias respecto a la eficacia para subsanar las pérdidas por ETP y permitir la recarga al sistema subterráneo aún durante períodos de baja precipitación determina que las sequías de tipo hidrológico sean de mayor, menor o de igual duración a las sequías meteorológicas (Apurv et al., 2017). La aridez por su parte, definida en función de la demanda evaporativa, afecta la humedad en el suelo, este flujo a su vez actúa directamente en el ciclo de retroalimentación superficie-atmósfera. Cuando la humedad del suelo es insuficiente, la evaporación disminuye y aumenta el calor sensible que incrementa la temperatura y el déficit de presión de vapor, lo que se traduce en mayor demanda evaporativa y en la intensificación de la sequía (Pendergrass et al., 2020).

En la superficie, la reducción en el contenido de humedad en el suelo afecta la salud de la vegetación, a través del estrés hídrico que a su vez produce una variación en el flujo de transpiración hacia la atmósfera (Pendergrass et al., 2020) reduciendo el flujo de calor latente y aumentando el calor sensible. La comprensión de las alteraciones en la humedad del suelo y en las condiciones de la vegetación durante el desarrollo de los eventos secos puede ser de utilidad para el monitoreo de sequías y potencialmente como mecanismo de alerta temprana (Otkin et al., 2019).

Las investigaciones citadas anteriormente, revelan que una anomalía en las precipitaciones y/o en la temperatura es la vía de inicio hacia la propagación de una sequía (Van Loon et al., 2012). A raíz del déficit prolongado de lluvias, la entrada de agua al suelo desciende, por tanto, los niveles de humedad del suelo caen por debajo de lo normal, y en consecuencia se reduce la ETP. Potenciada por un incremento en la radiación, vientos más fuertes o déficit de presión de vapor, la demanda por ETP aumenta, por lo cual las pérdidas son mayores, hasta el punto en que este flujo se ve obstaculizado, ya sea por ausencia de humedad en el suelo y la muerte de las plantas o por el mecanismo de protección de la vegetación (cierre de estomas). La reducción en la humedad del suelo también afecta la recarga hacia el subsuelo, provocando el descenso de depósitos subterráneos y de la descarga (Van Loon, 2013).

Este proceso de propagación se caracteriza por cuatro elementos: 1) El agrupamiento: combinación o unión de varias sequías meteorológicas dentro de una sequía hidrológica; 2) la atenuación: los depósitos subterráneos evitan la propagación de la sequía meteorológica; 3) retraso: lapso entre la sequía meteorológica, la agrícola y la hidrológica; 4) alargamiento: la sequía meteorológica se extiende hasta convertirse en una sequía hidrológica. El retraso y la atenuación son determinados por las características de la cuenca: área, pendiente promedio, almacenamiento, respuesta de la cuenca (**Figura 19**). Mientras que el agrupamiento y el alargamiento están controladas por la cuenca y el clima (Van Loon y Van Lanen, 2012).

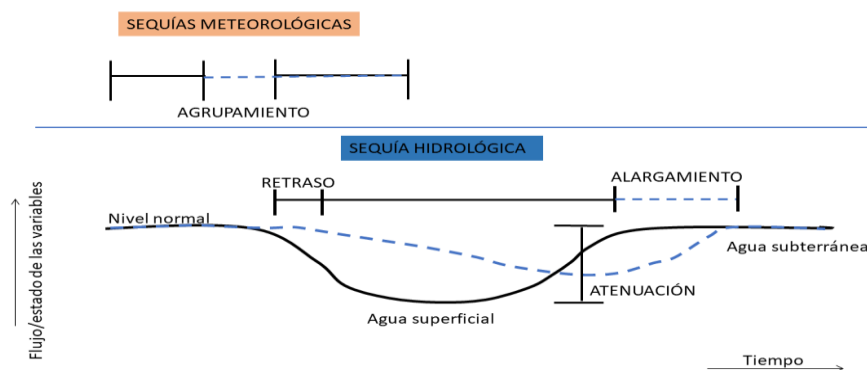


Figura 19. Diagrama de las características de la propagación de la sequía meteorológica hacia la sequía hidrológica.

Fuente: Van Loon y Van Lanen, 2012. Elaboración propia.

Para medir la intensificación de las condiciones secas y anticiparse a la propagación de la sequía se hace uso de diferentes metodologías, entre las que se incluyen los índices de sequía como el SPI, y otros índices como el índice de estrés evaporativa (ESI, por sus siglas en inglés, Anderson et al., 2007) para registrar cambios en la ET_0 (Otkin et al., 2015), información satelital para monitoreo de humedad del suelo y cambios en la vegetación (Otkin et al., 2018) y modelos de regresión o de predicción del comportamiento de la sequía y representación de la respuesta de cada uno de los componentes del sistema (Otkin et al., 2015). En términos de intensificación o propagación de las condiciones secas no es en sí el valor de los índices lo que importa sino las anomalías o los cambios presentados en estos en un corto lapso de tiempo (Otkin et al., 2018).

6.2. Calibración del modelo de partición

Las simulaciones de caudal generadas por el modelo capturan el comportamiento estacional interanual del río, sin embargo, muestra limitación en la captura de los flujos máximos registrados in situ (**Figura 20a**). Los picos de caudal registrados sobre los 200 mm no se logran reproducir con el modelo (**Figura 20b**).

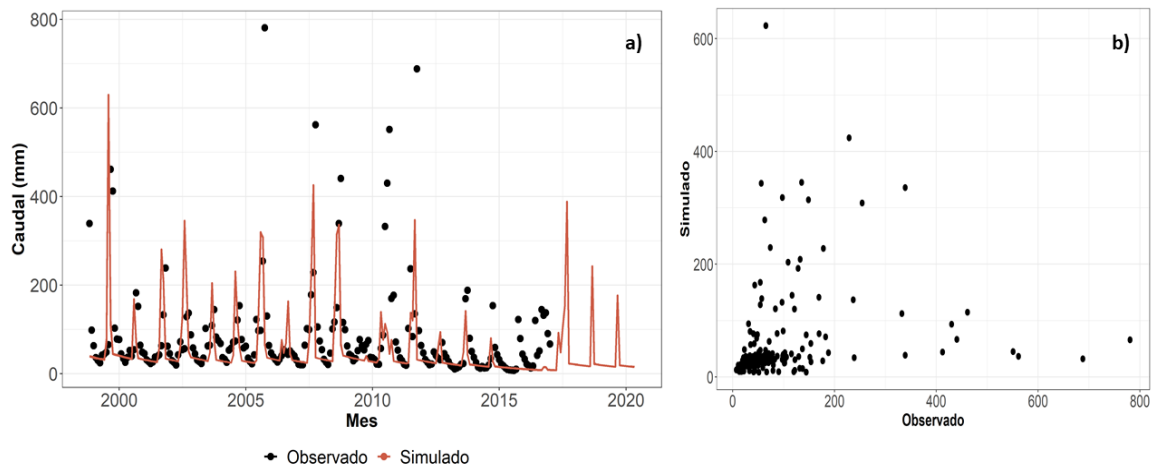


Figura 20. a) Caudal medio mensual simulado (línea café) y observado (puntos) para la estación La Guardia, Liberia. b) Relación entre los caudales observados y simulados. El modelo reproduce muy bien el comportamiento del río especialmente los valores bajos de caudal, le cuesta reproducir valores de caudal sobre los 200 mm. Elaboración propia.

Las variables relacionadas con la partición presentan una variabilidad relacionada con el cambio de estación (**Figura 21**) y una variación intraestacional asociada con cambios en la precipitación producto de la influencia directa del MSD. La precipitación neta, estimada con el modelo hidrológico acoplado, presenta el comportamiento característico de la vertiente pacífica centroamericana. Sin embargo, en comparación con el ciclo anual analizado previamente (**Figura 7b**), los estimados de lluvia promedio mensual son más altos, y sobresale el mes de septiembre con la mayor precipitación, mientras que octubre pasa a ser un mes transicional (**Figura 21a**).

El comportamiento de la intercepción es similar al de la precipitación neta, mayor estimados durante la temporada lluviosa, sin embargo, en contraposición con la lluvia, la intercepción aumenta ligeramente durante julio (**Figura 21b**). También se destaca, los mayores rangos de variación durante los meses secos y especialmente durante los meses de transición.

El ciclo anual de la evaporación tiene un menor rango de variabilidad durante la temporada lluviosa comparado con el resto de las variables analizadas (**Figura 21c**). Durante los meses secos se obtienen los estimados de evaporación más grandes, llegando hasta los 50 mm en promedio en febrero, se reducen a 30 mm en promedio en abril y luego a la mitad o más durante los meses lluviosos. Se identifica que la principal diferencia en la evaporación se obtiene durante la época seca y una vez establecido el primer período de lluvias las condiciones son relativamente estables. Incluso en presencia del efecto del MSD, los resultados sugieren que el sistema mantiene un nivel más o menos estable de evaporación que puede verse favorecido por el contenido de humedad presente en el suelo y que apenas aumenta ligeramente durante el establecimiento del segundo período de lluvias.

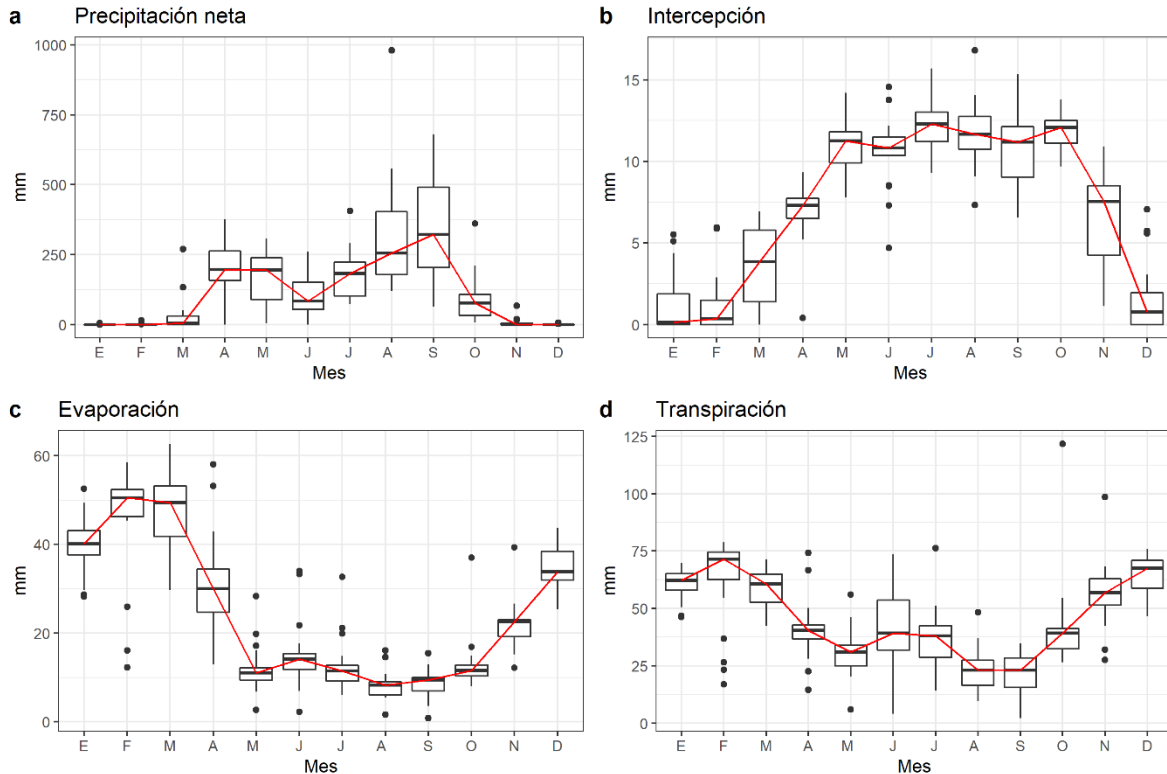


Figura 21. Climatología anual de las variables relacionadas con ETP estimadas con el modelo acoplado con LAI para la estación aeropuerto, Liberia. Con excepción de la transpiración, en todas las variables relacionadas con la ETP la mayor variabilidad ocurre durante los meses lluviosos. Elaboración propia.

La variación interanual de la transpiración dificulta la determinación de los cambios estacionales, sin embargo, presenta un comportamiento similar al de la evaporación, con estimados mayores durante la temporada seca y poca variabilidad en los acumulados durante los meses secos (**Figura 21d**). Se diferencia en un aumento mucho más visible de la transpiración durante los meses de junio-julio, donde también se obtuvieron los mayores rangos de variación. De manera que, aunque no fue posible determinar con la información de NDVI una relación clara entre las condiciones de desarrollo de sequía, el resultado de la partición sugiere un papel importante del establecimiento de las condiciones secas en el comportamiento de la transpiración, en el cual es fundamental el comportamiento de las plantas. Se debe destacar, que esto puede sugerir que la escala espacial de la información del NDVI, así como su frecuencia temporal puede no ser suficiente para capturar la señal de las condiciones secas, que parecen responder mejor en escalas menores al mes y muestran un comportamiento muy local.

Los acumulados anuales de las variables relacionadas con la partición sugieren que, a pesar de la variación en el comportamiento interanual, el volumen de intercepción y de evaporación se mantiene relativamente estable (**Figura 22**).

En el caso de las otras variables, aunque los estimados de precipitación neta son los más importantes, durante años con menores estimados generales, la transpiración parece cobrar mayor importancia.

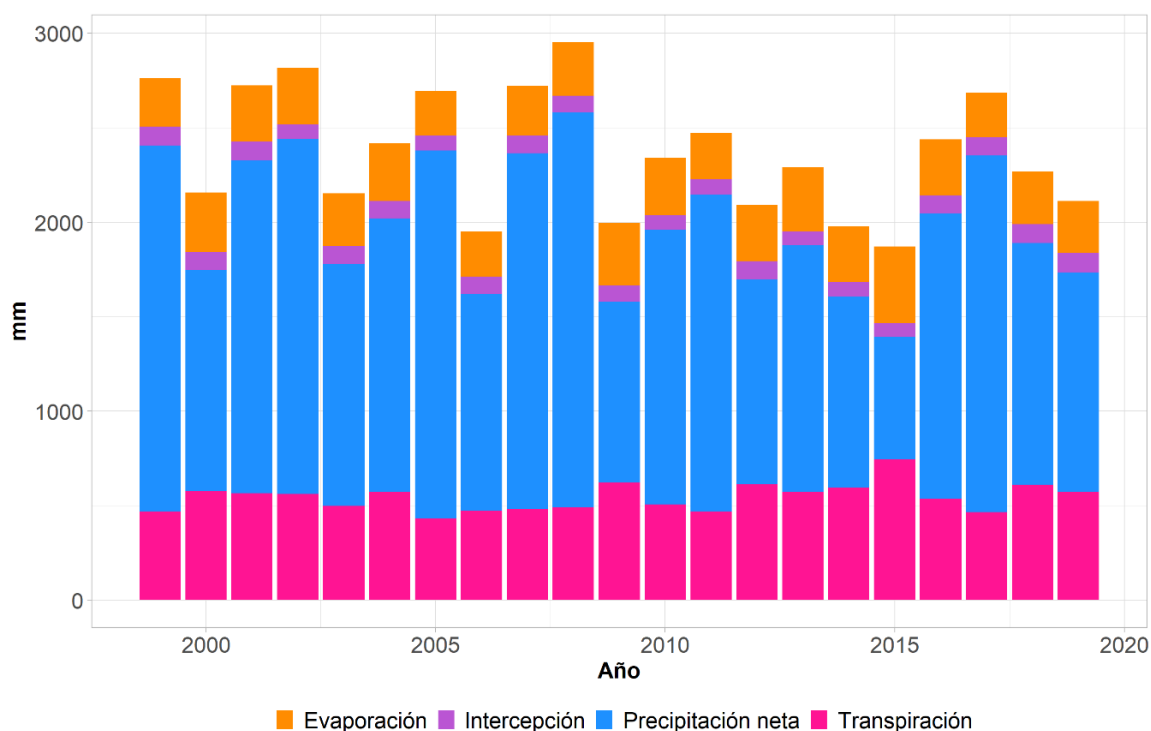


Figura 22. Distribución anual de las variables relacionadas con la Ea para la estación aeropuerto, Liberia. Hay poca variación en los estimados de intercepción y evaporación a pesar de la variabilidad interanual. Elaboración propia.

En cuanto a la relación entre los cambios en la vegetación con base en el NDVI y la partición de la transpiración modelada, se muestra que el NDVI, en la escala mensual no es capaz de capturar la variación del comportamiento de la vegetación a nivel interanual, por lo que su uso es limitado. Por el contrario, la serie de anomalías de transpiración modelada muestra una marcada variación en escalas interanuales. Lo que es más relevante es que su comportamiento muestra picos en períodos caracterizados por la influencia del fenómeno ENOS (**Figura 23**), por lo que se destaca que mejorar nuestra comprensión del comportamiento de la transpiración puede ayudar a indagar aspectos más específicos sobre la forma en que se establece y propaga la sequía. Es decir, la partición de la ET permite realizar un monitoreo más riguroso de la propagación de los eventos secos.

Al principio del período analizado se obtuvieron anomalías de transpiración negativas seguidas de un pico de máxima transpiración en 1999, a partir de entonces y hasta el 2009 aproximadamente el rango de variación en las anomalías de transpiración es de entre -2 y 1, en su mayoría cercano a por debajo de 0. Luego de una variación entre anomalías positivas

y negativas fuertes entre el 2009 y el 2011, a partir del 2012 y hasta mediados del 2016 todas las anomalías de transpiración estuvieron por encima de 0. Durante la segunda mitad del 2016 y todo el 2017 la transpiración estimada se mantuvo por debajo o cercano a los valores normales, al final del periodo analizado la mayoría de las anomalías fueron positivas.

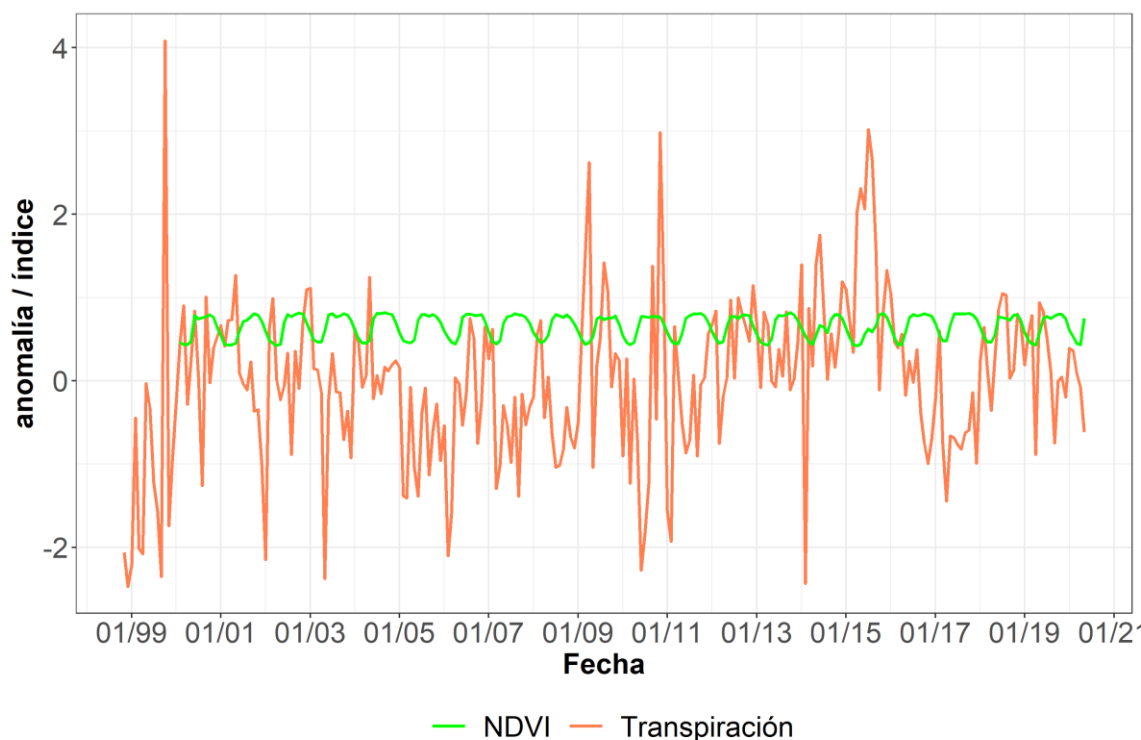


Figura 23. Anomalías de transpiración (línea color rosa) y NDVI (línea color verde) para la estación aeropuerto, Liberia. Los valores más altos de NDVI se relacionan con anomalías de transpiración negativas y a la inversa. Elaboración propia.

6.3. Influencia del ENOS sobre el comportamiento de la transpiración

La correlación entre la transpiración y el ENOS fue baja y de poca significancia durante la mayoría de los meses. Sin embargo, durante parte del período seco y principalmente durante el segundo período de lluvias, eso cambia y la significancia de la correlación aumenta (**Figura 24**). A excepción de marzo y octubre, todas las correlaciones obtenidas fueron de signo positivo. En los meses de noviembre, febrero, abril y mayo se obtuvieron correlaciones positivas bajas, la correlación fue cercana a los 0.4 en septiembre, diciembre y enero. Las correlaciones significativas más importantes se obtuvieron en junio, julio y agosto, siendo la más importante la de julio (superior a 0.8).

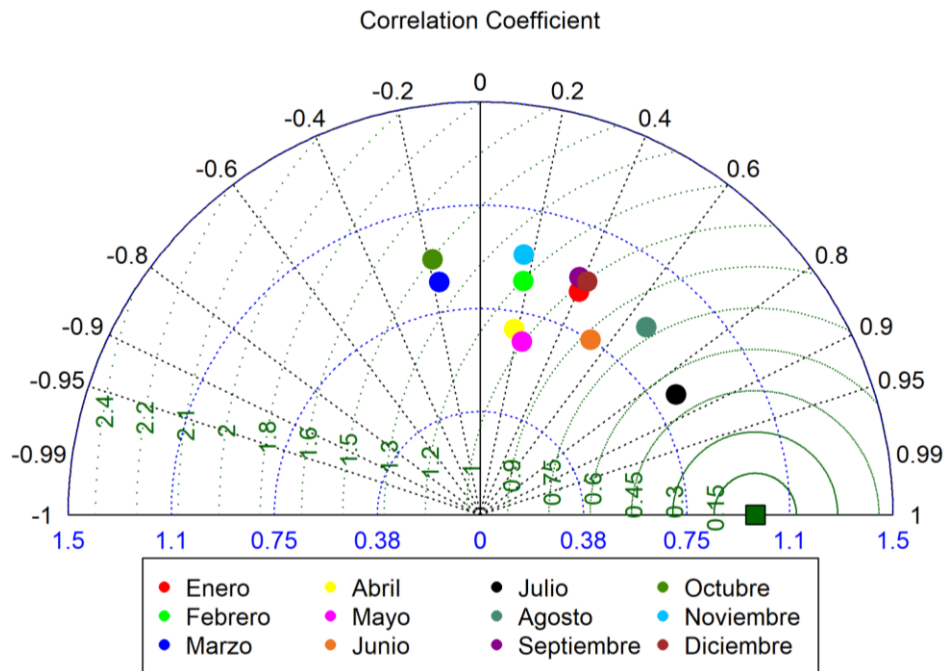


Figura 24. Diagrama de Taylor representativo de la correlación mensual entre las anomalías de transpiración y el MEI en la estación Aeropuerto, Liberia. La influencia del ENOS es de mayor significancia durante junio, julio y agosto
Elaboración propia.

Este comportamiento de las anomalías de la transpiración modelada, sugiere que en el sitio de estudio durante eventos cálidos (El Niño) la tasa de transpiración aumenta de manera importante durante el segundo período de lluvias. Cabe indicar que este resultado puede tener varias causas, desde el aumento de transpiración por las condiciones de estrés hídrico en condiciones de menor precipitación hasta la influencia de eventos de lluvia durante el segundo período del año. Lo que sí es claro, es que la transpiración no responde mediante cambios inmediatos durante el primer período de lluvias, sino que es en el segundo período del año donde muestra su respuesta a las variaciones de la lluvia. De alguna manera, se puede proponer que, durante el primer período de lluvia, el sistema viene más influenciado por las condiciones secas normales del período seco y no es tan reactivo al déficit hídrico. Mientras que la reacción en términos de la transpiración se identifica cuando se mantiene un déficit sostenido, es decir se encuentra en proceso la transición entre la sequía meteorológica y la sequía agrícola. Esto tiene una implicación importante, porque mientras se determinó que el NDVI no es un buen indicador de esta transición en el desarrollo de la sequía, la transpiración sí responde como un indicador del proceso. Es evidente que la aproximación utilizada es simplificada, pero a pesar de esta simplificación permite la evaluación de un indicador más adecuado para monitorear la evolución del evento seco a partir de la vegetación. Como consecuencia, es de esperar que estimaciones más robustas de la partición permitan una mejor cuantificación de la transpiración y de su papel en la evolución de eventos secos.

7. Proyecciones.

Una vez establecida una caracterización de las condiciones climáticas, así como de influencia de la variabilidad interanual a partir de una línea base, es posible identificar los cambios en las condiciones de las diferentes variables meteorológicas e hidrológicas a largo plazo. Junto con la identificación y atribución de variaciones al impacto de los modos de variabilidad como el ENOS, es posible determinar la relación entre los cambios a largo plazo y el cambio climático observados en el registro histórico. Este tipo de análisis depende de la disponibilidad de información en períodos de al menos 30 años, por lo que en la región se limitan a los sectores en los que esta información existe. En los capítulos 3, 4 y 5 se analizó el comportamiento climatológico de la región Chorotega para las variables disponibles de temperatura y precipitación, se analizó el desarrollo de condiciones de sequía para el periodo observacional disponible y se identificó la influencia del ENOS sobre éstas. Considerando el resultado de que la fase cálida del ENOS se asocia con el desarrollo de sequía y que eventos cálidos del ENOS de alta intensidad potencian el desarrollo de sequías severas y prolongadas y que los escenarios de clima futuro proyectan condiciones similares a fase cálida del ENOS más intensas (Perry et al., 2017; Yun et al., 2021), se considera pertinente evaluar el comportamiento futuro proyectado para finalizar esta investigación.

Hay una gran variedad de escenarios de clima futuro disponibles, en su mayoría correspondientes a experimentos derivados de CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) y que a su vez consideran los RCPs (Representative Concentration Pathways). Los RCPs son algunos de los posibles escenarios obtenidos a largo plazo bajo diversas condiciones específicas de concentración de emisiones, uso y cobertura del suelo (Moss et al., 2010). De los productos disponibles, se descartó el uso de proyecciones globales debido a la escala espacial del sitio de estudio y se optó por seleccionar las proyecciones generadas mediante un experimento de acople oceánico de publicación reciente (Cabos et al., 2019). Lo anterior debido a que ha sido previamente validado para la región con buenos resultados y al considerar el acople oceánico hace una mejor representación de los procesos de mayor importancia para la región de estudio en que el océano es un elemento fundamental. Se parte entonces de las proyecciones de Cabos et al., (2019) para los escenarios RCP4.5 (escenario conservador) y RCP8.5 (escenario extremo pesimista).

Se proyecta un incremento en la temperatura media para toda la región, especialmente en el sector sur y suroeste (**Figura 25**). En el escenario proyectado para RCP4.5, antes del 2050, no habría cambios apreciables en la temperatura, a excepción de un aumento de 0.5 °C sobre costa sur, suroeste y la península de Nicoya. A mediados de siglo sí se experimentaría un cambio en la temperatura media de toda la región. En el escenario de RCP8.5 el cambio de 0.5 °C se experimentaría durante la década actual, y se percibiría otro aumento de 1 °C por década desde el 2040.

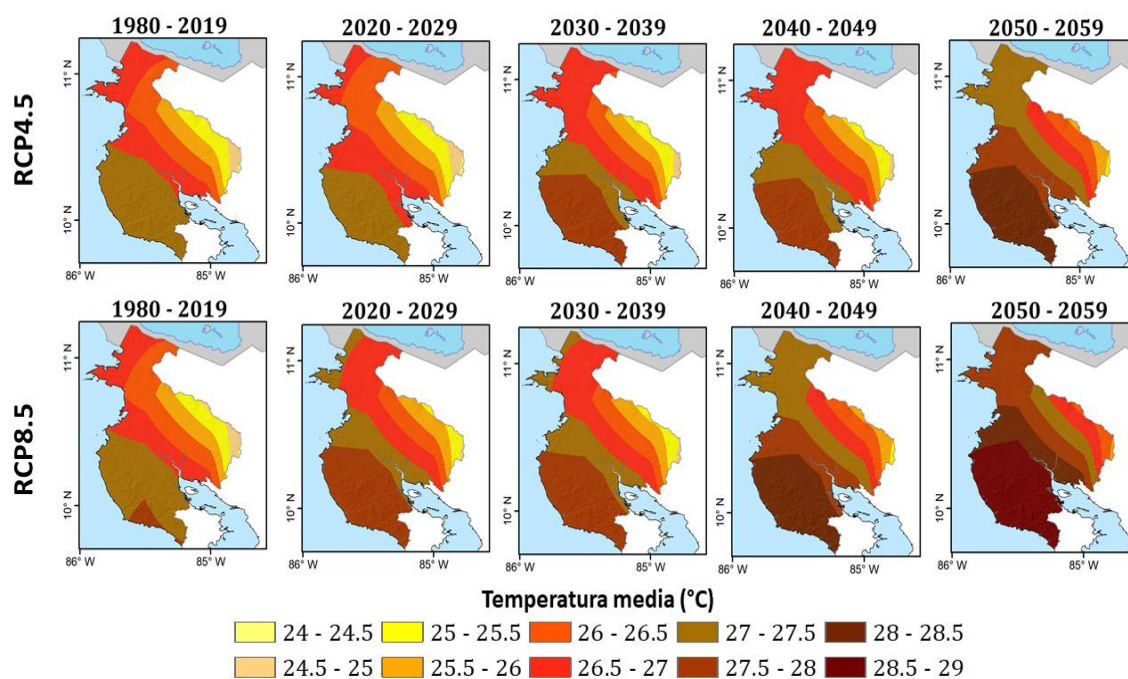


Figura 25. Comportamiento de la temperatura media anual según las proyecciones RCP4.5 (arriba) y RCP8.5(abajo) para distintos períodos. Los aumentos de temperatura más importantes se darían sobre el sector costero sur y la península de Nicoya.

Fuente de datos: Cabos et al., 2019. Elaboración propia.

A diferencia de la temperatura media, cuyo comportamiento parece estar relacionado con las diferencias de elevación de la región Chorotega, la temperatura máxima se altera desde el centro hasta los bordes, siendo el área de la cuenca Tempisque-Bebedero la que experimentaría los valores más altos y los cambios más significativos (**Figura 26**). En ambos escenarios se determina un sector con máximas temperaturas cerca de las partes bajas y desembocadura del río Tempisque, las cuales se van intensificando y extendiendo hacia los lados hasta prácticamente cubrir toda la cuenca y el área de la Península de Nicoya.

Estos aumentos en la temperatura dificultan la complicada situación hídrica de la región al potenciar el incremento de la aridez de los suelos. Además, estos aumentos en la temperatura son importantes al considerar el impacto que pueden tener sobre las condiciones de temperatura óptima de los cultivos de la zona, ya que en algunos tipos de cultivo se estaría aumentando el estrés térmico de las plantas, lo que puede influenciar de forma negativa sobre la producción. De manera similar, el aumento de las temperaturas afecta al ganado, con lo que las actividades de este sector se pueden ver afectadas. La afectación no se limita a términos productivos, en términos sociales, los incrementos en las temperaturas conllevarían riesgos a la salud, ya que representan mayor exposición a altas temperaturas, especialmente las condiciones de temperatura máxima.

Por consiguiente, bajo estas condiciones, los trabajadores de campo podrían estar sujetos a trabajar bajo condiciones de calor extremos que pueden causar afectaciones importantes sobre la salud humana.

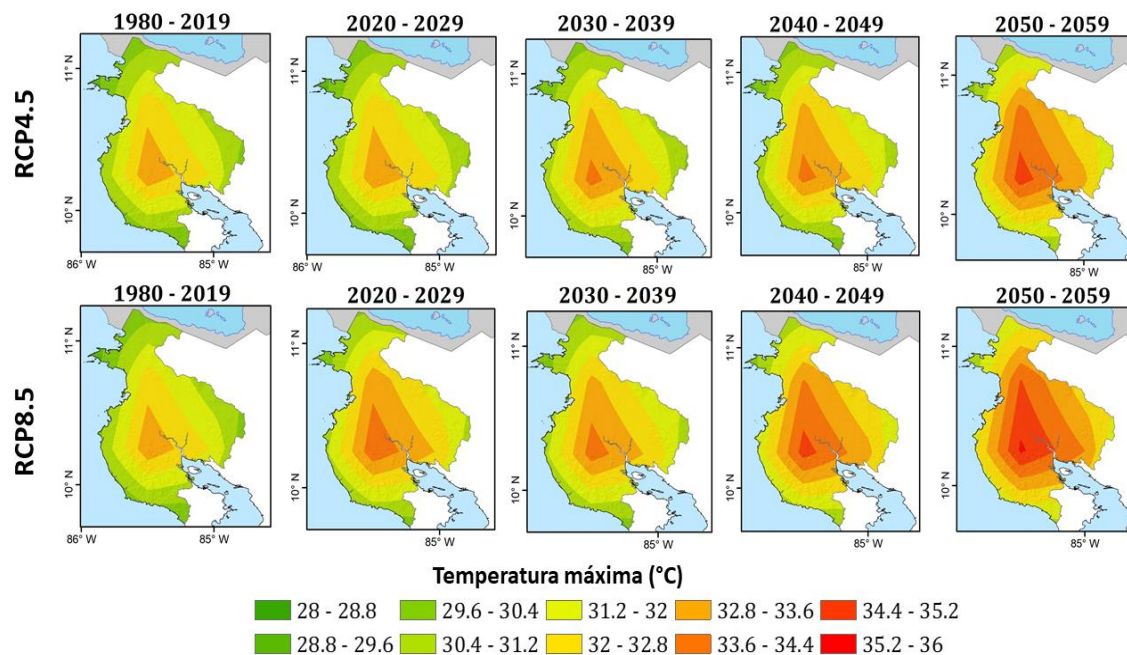


Figura 26. Comportamiento de la temperatura máxima anual según las proyecciones RCP4.5 (arriba) y RCP8.5 (abajo) para distintos períodos. Se presenta una intensificación y extensión del área con las temperaturas máximas más altas, hasta cubrir gran parte de la región Chorotega.

Fuente de datos: Cabos et al., 2019. Elaboración propia.

Bajo las condiciones preestablecidas en ambos escenarios, se identifica una reducción en la precipitación. La **Figura 27** muestra el acumulado promedio climatológico y el comportamiento del acumulado promedio en escala decenal hasta el 2060. Los resultados indican que bajo condiciones extremas (RCP8.5) la reducción de la lluvia podría ser casi la mitad del abastecimiento actual de precipitación para mediados del siglo (**Figura 27**). La reducción es sostenida en toda la región bajo ambos escenarios y se identifica que el sector de la cuenca Tempisque-Bebedero es el que se proyecta con la mayor afectación, siendo actualmente uno de los puntos más importantes a nivel nacional de la actividad agrícola, y donde se encuentra el distrito de riego, es donde se proyectan la reducción de precipitación más severa de la región. La reducción de precipitación proyectada en la cuenca Tempisque-Bebedero supone un reto importante en cuanto al manejo del recurso hídrico y se considera que esta información es relevante en el contexto de los planes de manejo asociados con la operación del distrito de riego Arenal-Tempisque.

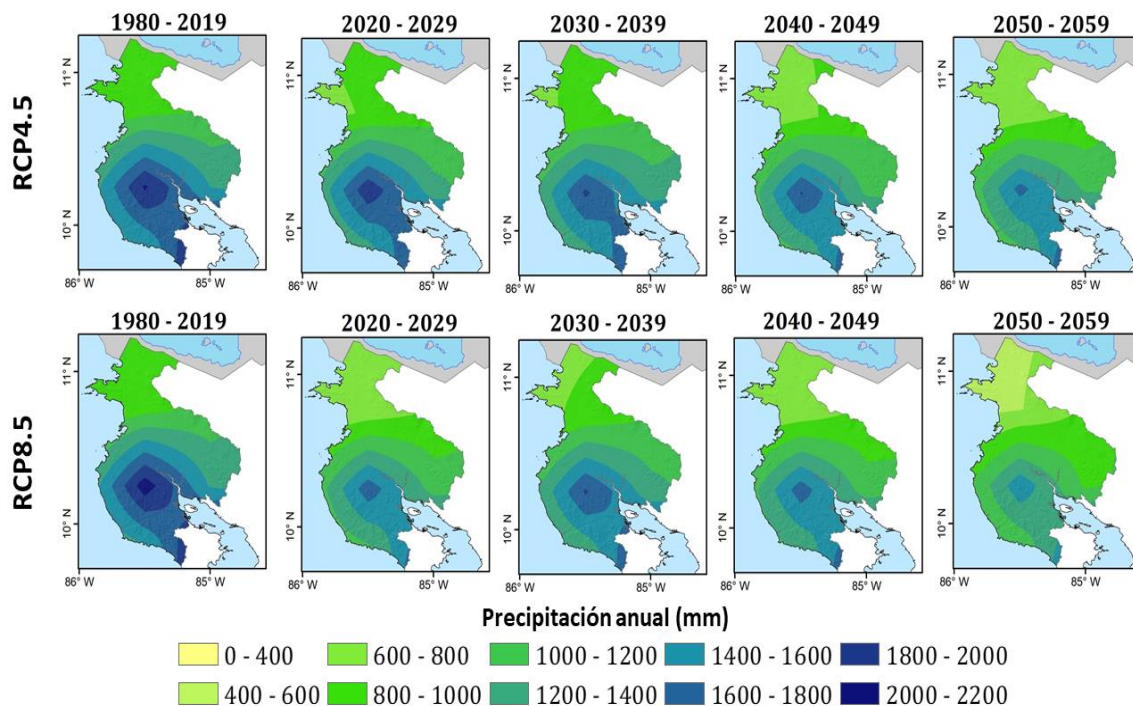


Figura 27. Comportamiento de la precipitación media anual según las proyecciones RCP4.5 (arriba) y RCP8.5(abajo) para distintos períodos. El secado más intenso y preocupante de la región se localiza sobre la cuenca Tempisque-Bebedero.

Fuente de datos: Cabos et al., 2019. Elaboración propia.

En el escenario basado en RCP4.5, las alteraciones más severas se podrían sufrir alrededor de 30 años en el futuro, pero bajo condiciones más extremas esto ocurriría aún más rápido con una pérdida promedio de 400-800 mm de la precipitación anual en menos de 20 años. En cualquiera de los dos casos, la reducción hídrica podría alterar la actividad agrícola en la región, comprometer a largo plazo la seguridad alimentaria y el desarrollo de las actividades socioeconómicas de la región y aumentar los conflictos por el agua.

Estos cambios de reducción (aumento) en la precipitación (temperatura) proyectados por los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, se traducen en potenciales condiciones de sequía más severas con el paso del tiempo, especialmente a partir de mediados de siglo. Las estimaciones sugieren que bajo las condiciones plausibles del RCP4.5 en la región Chorotega se experimentaría gran variabilidad relativa a los eventos de sequía meteorológica estimados con el SPI-12 (**Figura 28**). Las condiciones secas serían severas, pero aún se presentarían eventos húmedos entre ellos. En este escenario el comportamiento entre Nicoya y Liberia se presenta muy similar, con la única diferencia que en Liberia los eventos secos son ligeramente más prolongados que los eventos proyectados para Nicoya.

En el escenario pesimista (RCP8.5), las condiciones secas se volverían más extremas, con poca variabilidad, especialmente alrededor del año 2070 donde técnicamente desaparecen los eventos húmedos, volviéndose totalmente seco hasta finales de siglo. Las condiciones serían más severas para la región de Nicoya bajo este escenario. Se debe tomar en cuenta que al considerar períodos tan extensos en las proyecciones hay un sesgo asociado, no obstante, los resultados muestran una tendencia a condiciones secas significativas.

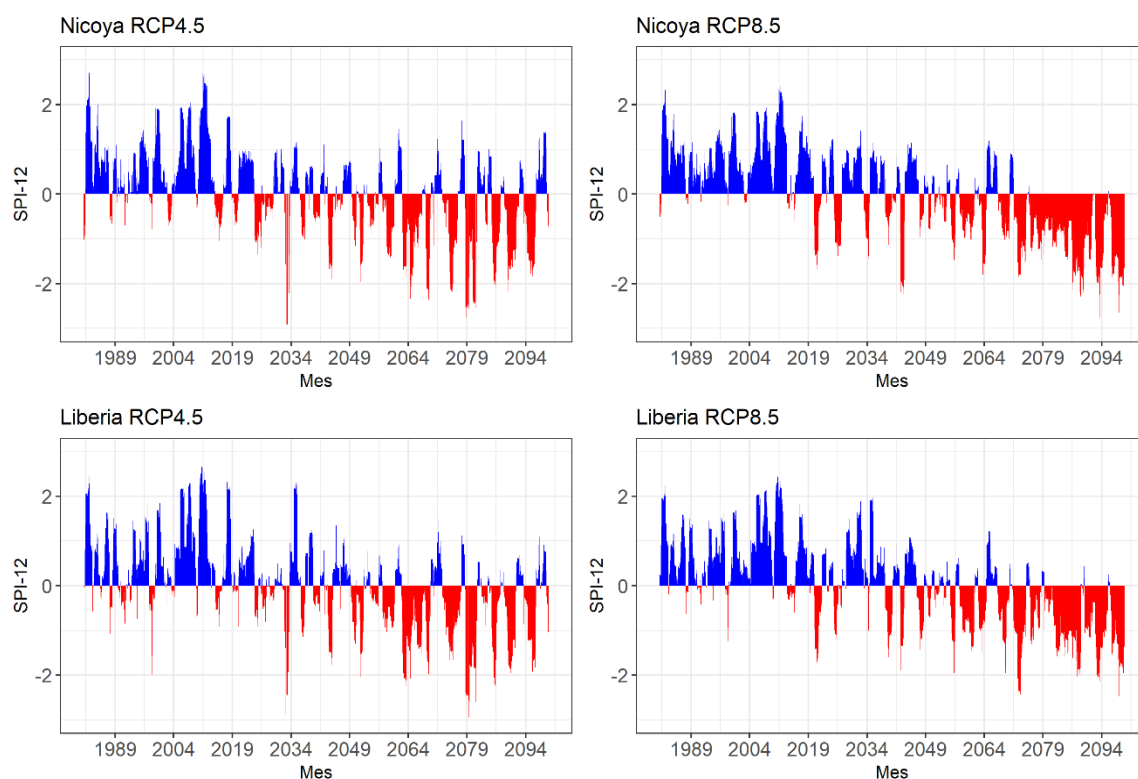


Figura 28. Valores proyectados del SPI-12 para Nicoya (arriba) y Liberia (abajo) según los escenarios RCP4.5 (izquierda) y RCP8.5 (derecha). Un comportamiento similar de variabilidad en las condiciones de sequía meteorológica entre las dos estaciones se presenta bajo el escenario RCP4.5; al contrario, en el escenario RCP8.5 se presentan diferencias entre estaciones y las condiciones secas se vuelven más severas.

Fuente de datos: Cabos et al., 2019. Elaboración propia.

Las mismas características y diferencias se evidenciaron para los eventos de sequía agrícola estimados con el SPEI-12 (**Figura 29**) con ligeras diferencias en la intensidad. Esto significaría que las condiciones secas afectarían todo el sistema hídrico que no podría solventar los requerimientos de la vegetación, con las consecuentes repercusiones que esto conlleva. Cabe aclarar que, en este caso la estimación de ET_0 y por tanto de SPEI está basada en el cálculo de Hargreaves, por tanto, se necesitaría de más variables para un estimado de ET más robusto que permita dilucidar las condiciones de sequía agrícola de forma más precisa. Lo que, desde el punto de vista local es una limitación de los modelos climáticos regionales en cuanto a la representación de la velocidad del viento y la radiación neta.

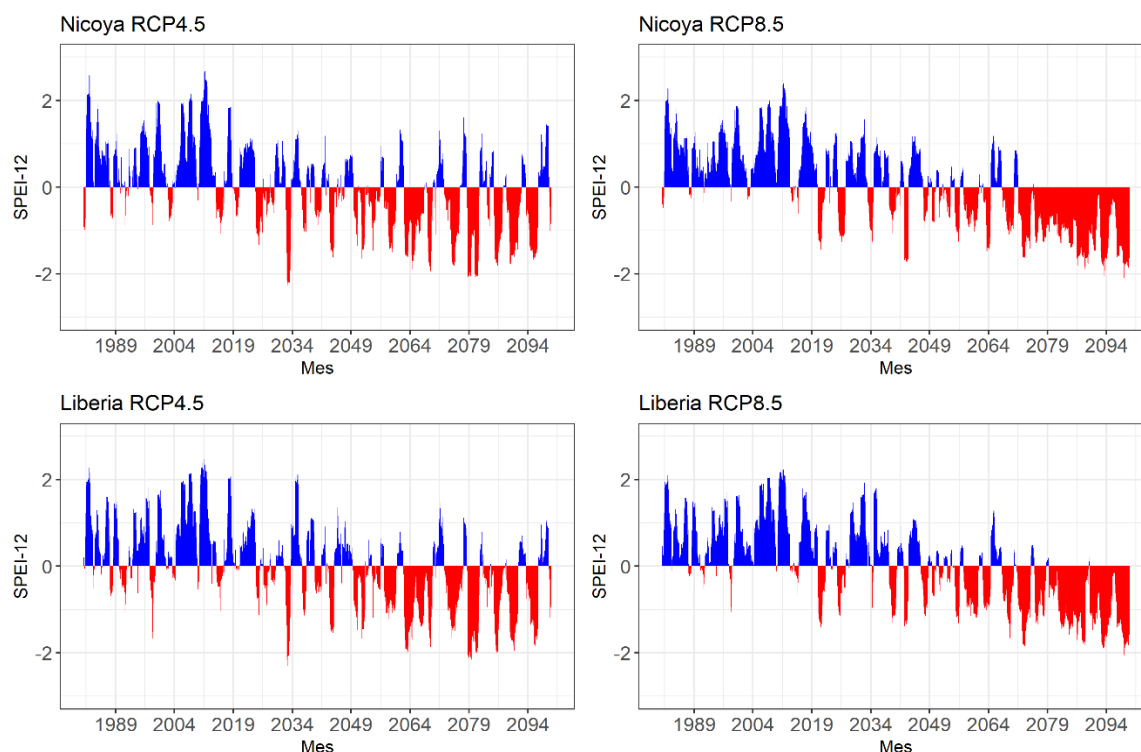


Figura 29. Valores proyectados del SPEI-12 para Nicoya (arriba) y Liberia (abajo) según los escenarios RCP4.5 (izquierda) y RCP8.5 (derecha). Se presentan las mismas condiciones estimadas por el SPI-12 con ligeras diferencias en la intensidad del índice de sequía.

Fuente de datos: Cabos et al., 2019. Elaboración propia.

A partir de la información de las proyecciones, se aplicó el modelo hidrológico acoplado con LAI descrito en la sección 2.2.5 para generar información inicial sobre el posible comportamiento futuro de las variables relacionadas con la ETP. Se obtiene como resultado que hay una tendencia hacia la disminución en el caso de la precipitación neta y la intercepción, especialmente en la precipitación neta, que denota una reducción considerable a partir del 2027 aproximadamente (**Figura 30a**). Dicha tendencia es más marcada bajo el escenario pesimista, mientras que en el escenario RCP4.5 se esperaría un ligero aumento de los valores alrededor del 2080.

La intercepción se mantiene relativamente estable, con la variabilidad estacional correspondiente, hasta el 2060 cuando los acumulados disminuyen, denotándose una tendencia hacia la baja en el escenario RCP8.5 (**Figura 30b**).

Las tendencias en los flujos correspondientes a la evaporación y la transpiración son, contrarias a las anteriores, hacia el aumento. En el caso de la evaporación se denota un incremento en los acumulados previo al 2020 y continuo hasta cerca de finales de siglo (~2090) donde se presenta una disminución en ambos escenarios (**Figura 30c**), con la diferencia que en el escenario conservador la variabilidad mensual es mayor, manteniéndose entre los 22-28mm.

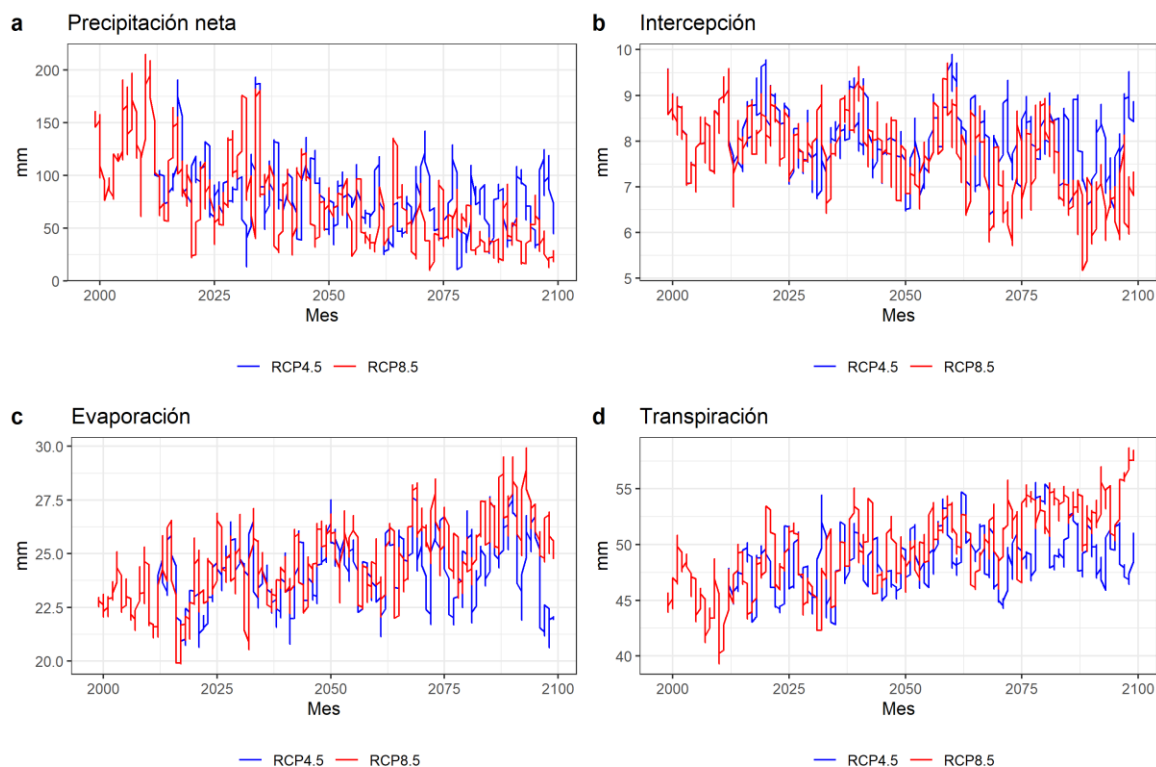


Figura 30. Acumulados mensuales de las variables relacionadas con ETP estimadas con el modelo hidrológico y los datos de los escenarios RCP4.5 (azul) y RCP8.5 (rojo) para la estación aeropuerto, Liberia, desde 1998 hasta el 2099. Se percibe una tendencia hacia la disminución en la precipitación neta y en la intercepción, y una tendencia hacia el aumento en evaporación y la transpiración, lo cual sigue un aumento en la demanda atmosférica y menor disponibilidad hídrica para sustentar las necesidades del medio.

Fuente de datos para el modelado acoplado con LAI: Cabos et al., 2019. Elaboración propia.

Los acumulados mensuales de transpiración son básicamente del doble que los de evaporación (**Figura 30d**), proyectándose un aumento continuado desde 2010 y hasta el fin del siglo en el escenario RCP8.5, las proyecciones según RCP4.5 no tienen una tendencia de aumento tan marcada, además se proyecta una disminución de los valores alrededor del 2080. Aunque ambos componentes de ETP tienden hacia el aumento, la diferencia en los acumulados implica que el mayor porcentaje de ETP será proporcionada por la vegetación.

Las proyecciones de precipitación no podrían explicar el aumento en transpiración y evaporación, debido a la disponibilidad de agua. Se hace la observación de que la información de entrada para el modelo se basa en la estimación de ET_0 utilizando Hargreaves y por lo tanto está basada en la temperatura. De manera que el valor estimado por el modelo para dichas variables tendrá el sesgo de la información de entrada y como resultado los aumentos en las variables modeladas estarían asociados con mayor demanda atmosférica propiciada por la temperatura y el calor latente. Posiblemente tanto las plantaciones como la vegetación natural de la zona se vean afectada por estos cambios. Se denota que los cambios en los acumulados son más rápidos en el escenario RCP8.5.

La información generada es relevante al identificarse un riesgo potencial al aumento en la demanda atmosférica que podría propiciar el desarrollo de eventos secos de mayor intensidad y como resultado contribuir con una reducción drástica de la precipitación en la región. Estos resultados motivan no solo la aplicación de modelos que tengan una mejor representación de los procesos, sino que también el uso de la transpiración como un mejor indicador físico del desarrollo de la sequía agrícola. Finalmente, esta investigación muestra la relevancia de extender el estudio al Corredor Seco Centroamericano, así como analizar otras regiones del país que tienen características climáticas diferentes a la región Chorotega para tener una mejor comprensión de los contrastes locales en cuanto a la respuesta a los escenarios que sugieren reducciones en la precipitación en la región, así como el aumento de temperatura.

8. Conclusiones y recomendaciones.

Esta investigación realizó una revisión del comportamiento de los eventos secos en la región Chorotega con base en el registro observacional histórico disponible. Se evaluó la influencia de los métodos de estimación de la evapotranspiración en la identificación de eventos de sequía meteorológica, así como la relación entre el desarrollo de los eventos secos con índices de vegetación derivados de estimaciones satelitales. En concordancia con estudios previos se analizó la influencia del ENOS en el desarrollo de los eventos secos. Se aplicó un modelo de partición sencillo para realizar una evaluación básica del comportamiento modelado de los componentes de la partición de la precipitación. A partir de proyecciones futuras con base en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 generadas mediante modelado con acople oceánico (Cabos et al.,2019) se evaluó los potenciales cambios en las variables de precipitación y temperatura en la región, así como la estimación de potenciales cambios en la transpiración para una aproximación inicial. Se determinó que, de acuerdo con las proyecciones, se espera que los eventos secos se agraven en la región, por lo que es importante considerar esta información para la planificación del manejo de recurso hídrico en la región, ya que se proyecta que la cuenca Tempisque-Bebedero sea una de las regiones más afectadas por las condiciones de calentamiento y reducción de precipitación. A continuación, se listan las conclusiones derivadas de este estudio.

La región Chorotega se caracteriza por sus condiciones secas relativas (sobre los 1000 mm anuales con lo que es la zona con menor precipitación del país). La distribución espacial de la lluvia es discontinua, y temporalmente su ciclo anual se asocia con la influencia del periodo del *veranillo* y los sistemas de escala sinóptica (por ejemplo, ondas tropicales, ciclones). La variabilidad de las precipitaciones a nivel interanual, se asocia con eventos hidrometeorológicos extremos (sequías, inundaciones). La temperatura está asociada con la elevación, pero varía estacionalmente, y a lo largo del día tiene un marcado rango diurno de temperatura, este comportamiento de la temperatura es favorable para el ciclo de reproducción de la vegetación.

A pesar de la simplicidad y pocas variables necesarias, las estimaciones de ET basadas en balance de energía tienden a la sobrestimación, esta sobrestimación es resultado de la sustitución de la radiación neta por factores como la latitud. Bajo un estimado más robusto, la ET tiene una distribución espacial similar a la de la temperatura, pero su ciclo anual está condicionado por la disponibilidad en superficie y el potencial radiativo. En la medida de lo posible se sugiere utilizar estimaciones que incluyan explícitamente la radiación neta y el viento, ya que son factores importantes que marcan diferencia en el comportamiento de la estimación de ET.

A partir de las estimaciones de los índices de sequía (SPI, SPEI) se contabilizaron alrededor de 117 eventos de sequía meteorológica en el período 1998-2019 en las estaciones de Liberia, Bagaces, Nicoya y Santa Cruz. En el caso de la sequía agrícola, cuya formulación requiere de la ET y por tanto del método de estimación, se contabilizaron 102 eventos utilizando la ecuación de balance energético de Hargreaves, sin variación entre estaciones. La contabilización se redujo y también presentó una variación espacial al estimar la ET_0 con el método de Penman-Monteith (44 eventos en Santa Cruz, 92 en Nicoya, 79 en Liberia y 89 en Bagaces).

Considerando las anomalías de precipitación además del SPEI-12, se identificaron los eventos secos de la región, los cuales se volvieron más intensos y extensos a partir de la segunda mitad del período analizado (1998-2019). Los eventos de mayor duración en cada una de las estaciones se identificaron alrededor de 2010-2015. Durante los períodos de sequía, los déficits de precipitación más importantes se localizaron entre septiembre y octubre.

La aridez, estimada como la relación P/ETP y su correspondencia con la vegetación presento correlaciones significativas (95%) con índice de verdosidad NDVI en forma general en las estaciones de Aeropuerto, Liberia y Hacienda Mojica, mientras en escala mensual solo en las estaciones de Aeropuerto y Santa Cruz se obtuvieron correlaciones de moderada significancia en algunos meses de la temporada lluviosa (junio, julio, agosto, septiembre y octubre), meses de transición (mayo) y meses secos (abril y diciembre). La respuesta de la vegetación a los eventos secos no es uniforme y parece tener un desfase de varios meses, el cual puede estar relacionado con la capacidad del suelo y el tipo de vegetación presente, además su identificación con productos remotos se ve alterada por las actividades agrícolas, incluyendo el riego, y el uso del suelo. Además, se debe considerar la influencia de la resolución y la capacidad de la plataforma satelital, ya que en algunos casos debido a la cobertura espacial algunas de las coberturas asociadas con ciclos de cultivo corto pueden no ser capturadas de la mejor manera. Se considera importante motivar el desarrollo de evaluaciones de campo que permitan una mejor evaluación de los productos satelitales para vegetación en la escala más local, ya que en distancias cortas se encuentran variaciones importantes en el tipo de vegetación e incluso el estado fenológico de los cultivos.

Se determinó que el modo de variabilidad ENOS tiene una correlación significativa negativa con las anomalías de precipitación en el trimestre ASO, mientras que con el modo de variabilidad PDO, las correlaciones son menos significativas y se estimaron casi en su totalidad en el mes de agosto. En este mes particular se observó que cuando ambos modos tuvieron valores positivos (negativos) se identificó una anomalía negativa (positiva) de precipitación. Lo que permite confirmar la relación de refuerzo de la PDO sobre la intensidad de la fase del ENOS.

Durante los eventos secos identificados, se observó un retraso en la respuesta de la humedad del suelo, y mucha variabilidad en el estimado de ET. El NDVI, por su parte, no captura adecuadamente los cambios a nivel de vegetación experimentados debido a las condiciones secas, por lo cual no se recomienda el uso de este índice para estudios de sequía en la región, al menos en la escala de cultivos. Hay que tomar en cuenta que el riego es un factor que puede alterar el resultado, ya que plantaciones con riego durante los periodos secos pueden mantener el verdor de las plantas. En este aspecto, no fue posible obtener información de riego en los sitios de estudio, por lo que no se pudo corroborar si la baja capacidad del NDVI de capturar el desarrollo de eventos secos pudo estar influenciado por el acceso a riego.

Se ejecutaron dos modelos de partición, el primer modelo utilizado es muy simple y como primera aproximación motivó el estudio de la transpiración mediante metodologías más robustas. El modelo mejorado, fue acoplado con LAI e isótopos estables de agua para justificar la separación de ET. La calibración con datos in-situ determinó la aptitud del mismo para capturar el comportamiento estacional e interanual, pero se queda corto en la representación de los picos extremos de caudal. Las variables relacionadas con la ET mostraron un marcado comportamiento inter e intraestacional y la influencia directa del MSD. A diferencia de la precipitación neta, la intercepción, la evaporación y la transpiración tienen un ligero aumento durante julio. Con base en los resultados del modelo implementado se determinó que la transpiración sí muestra una relación con los cambios en la vegetación que no fueron capturados por el NDVI. La transpiración modelada tiene correlaciones significativas con el ENOS en el trimestre JJA. En este sentido, el aporte de la aplicación del modelo de partición es indicar que la transpiración puede considerarse como un predictor de interés en el estudio del desarrollo de eventos secos, por lo que su monitoreo puede beneficiar la ejecución de diagnósticos del desarrollo de sequías en la región.

El análisis de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 determinó un potencial aumento de las temperaturas medias en la región Chorotega de alrededor de 2°C para 2050, y cerca de los 4°C para la temperatura máxima, la precipitación por su parte podría verse reducida a la mitad del acumulado anual estimado para el periodo histórico bajo un escenario extremo pesimista. El área con mayor afectación sería la cuenca Tempisque-Bebedero, con las repercusiones y dificultades para el sector agroeconómico y social que esto ocasionaría. Consecuentemente se proyectan frecuentes sequías meteorológicas y agrícolas más intensas y de mayor duración a largo plazo. La tendencia en los acumulados mensuales de las variables relacionadas con ETP es hacia el descenso en la precipitación neta que podría experimentar un ligero aumento a partir del 2080 bajo el escenario RCP4.5. La intercepción se mantendría relativamente estable hasta 2060 cuando empezaría una tendencia hacia la disminución. Ambos componentes de la ETP tienden al aumento desde el 2020 y se mantendrían hasta el final del siglo. Estos aumentos, debido a la ET_0 utilizada en el modelo, estaría vinculado con demanda atmosférica y no en la disponibilidad hídrica de la región.

Referencias

- Aguilar, S., Ríos, M. y Ureña, A. (2018) *Estimación de las áreas potenciales de recarga hídrica mediante mediciones de infiltración y modelación hidrológica en la microcuenca río Tigre para ayudar a la gestión del agua de la ASADA San Gabriel, San José, Costa Rica, 2016 – 2017*. Tesis para optar por el grado de licenciatura en Geografía. Universidad de Costa Rica.
- Alfaro, E. (2014) “Caracterización del “veranillo” en dos cuencas de la vertiente del Pacífico de Costa Rica, América Central (Characterization of the Mid Summer Drought in two Pacific slope river basin of Costa Rica, Central America), *International Journal of Tropical Biology*, 62, pp. 1-15.
- Alfaro, E., Quesada, A. y Solano, F. (2010) “Análisis del impacto en Costa Rica de los ciclones tropicales ocurridos en el Mar Caribe desde 1968 al 2007”, *Diálogos Revista Electrónica de Historia*, 11(2), pp. 22-38.
- Allen RG, Pereria LS, Raes D. y Smith M. (1998) “Crop Evapotranspiration – Guideline for computing crop water requirements”, *FAO Irrigation and drainage paper 56*.
- Alvarado, Y. (2018) *Análisis de los procesos de formación y renovación de aguas de recarga subterránea en la cuenca El Guayabo, Bajo Lempa, El Salvador*. Tesis de posgrado. Costa Rica, CATIE.
- Amador, J.A. (1998) “A climatic feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet”, *Top. Meteor. Oceanogr*, 5(2), pp. 1-13.
- Amador, J. A. (2008) “The intra-Americas sea low-level jet: Overview and future research”, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), pp. 153-188.
- Amador, J.A., Rivera, E.R., Durán-Quesada, A.M., Mora, G., Sáenz, F., Calderón, B. y Mora, N. (2016) “The easternmost tropical Pacific. Part I: A climate review”, *Rev. Biolo. Trop*, 64: S1-S22.
- Anderson, M. C., Norman, J. M., Mecikalski, J. R., Otkin, J.A. y Kustas, W.P. (2007) “A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental U.S. based on thermal remote sensing: 1. Model formulation”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D10).
- Apurv, T., Sivapalan, M. y Cai, X. (2017) “Understanding the role of climate characteristics in drought propagation”, *Water Resources Research*, 53(11), pp.9304-9329.

- Asadi Zarch, M.A. (2015) *Aridity and Drought in a Non-stationary Climate*. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. The University of The New South Wales.
- Astorga, Y. (2008) *XIV informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible: resultados preliminares: situación del recurso hídrico*. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación.
- Astorga, Y. (2016) “Gestión del recurso hídrico en Costa Rica”, *Ambientico*, 260, pp. 17-24.
- Banda, K., Delgado-Salinas, A., Dexter, K.G., Linares-Palomino, R., Oliveira-Filho, A., Prado, D., Pullan, M., Quintana, C., Riina, R., Rodríguez, G.M. y Weintritt, J. (2016) “Plant diversity patterns in neotropical dry forests and their conservation implications”, *Science*, 353(6306), pp.1383-1387.
- Barrantes, G., Jiménez, L. y Maldonado, T. (2005) *Informe final: Disponibilidad del recurso hídrico y sus implicaciones para el desarrollo de Costa Rica, XI informa sobre el estado de la nación en desarrollo humano sostenible*. Costa Rica: Programa Estado de la Nación.
- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F. y Latorre, B. (2014) “Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring”, *International Journal of Climatology*, 34(10), pp. 3001-3023.
- Bi, H., Ma, J., Zheng, W. y Zeng, J. (2016) “Comparison of soil moisture in GLDAS model simulations and in situ observations over the Tibetan Plateau”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, pp. 2658–2678.
- Birkel, C. (2005) “Sequía en Centroamérica: implementación metodológica espacial para la cuantificación de sequías en el golfo de Fonseca”, *Rev. Reflexiones*, 84 (1), pp. 57-70.
- Birkel, C y Demuth, S. (2006) “Drought in Costa Rica: temporal and spatial behaviour, trends and the relationship to atmospheric circulation patterns”, *International conference on FRIEND*. Havana, Cuba, noviembre 2006. IAHS Red Book, pp. 338-343.
- Birkel, C., Brenes, A. y Sánchez-Murillo, R. (2017) “The Tempisque-Bebedero catchment system: energy-water-food consensus in the seasonally dry tropics of northwestern Costa Rica”, *Nexus Outlook “Assessing international challenges”*, pp. 72-78.

- Birkel, C., Soulsby, C. y Tetzlaff, D. (2015) “Conceptual modelling to assess how the interplay of hydrological connectivity, catchment storage and tracer dynamics controls nonstationary water age estimates”, *Hydrological Processes*, 29(13), pp. 2956- 2969.
- Bonilla, A. (2014) *Patrones de sequía en Centroamérica. Su impacto en la producción de maíz y frijol y uso del Índice Normalizado de Precipitación para los sistemas de alerta temprana*. Tegucigalpa, Honduras: Global Water Partnership.
- Cabos, W., Sein, D.V., Durán-Quesada, A., Liguori, G., Koldunov, N.V., Martínez-López, B., Alvarez, F., Sieck, K., Limareva, N. y Pinto, J.G. (2019) “Dynamical downscaling of historical climate over CORDEX Central America domain with a regionally coupled atmosphere–ocean model”, *Climate dynamics*, 52(7), pp.4305-4328.
- Calderón, S. L., Guerrero, S. Z. y Villegas, M. T. D. (2017) “Política agropecuaria y pobreza rural: reflexiones a partir de dos casos en la Región Chorotega, Costa Rica”, *Universidad en Diálogo: Revista de Extensión*, 7(2), pp 73-96.
- Calvo-Solano, O., Quesada-Hernández, L., Hidalgo, H. y Gotlieb, Y. (2018) “Impactos de las sequías en el sector agropecuario del Corredor Seco Centroamericano”, *Agron. Mesoam*, 29(3), pp. 695-709.
- Cañada, E. (2019). “Water Conflicts in Guanacaste, Costa Rica: Responses to Tourism Development”, *Anuario de Estudios Centroamericanos*, 45, pp.323-344.
- Casanova, O. P. (1993) “Riesgo por sequías en Costa Rica”, *Rev. Geog. de América Central*, (25-26), pp. 385-405.
- Chaudhary R.C, Nanda J.S. y Tran D.V. (2003) *Guía para identificar las limitaciones en la producción de arroz*. FAO. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/006/y2778s/y2778s00.htm#Contents> [Consultado 29-6-2018].
- Chaware, S., Taley, S.M. y Jadhav, S.U. (2017) “PERFORMANCE OF DIFFERENT METHODS OF ESTIMATING POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION IN WESTERN VIDARBHA REGION”, *Contemporary Research in India*, 7(3), pp. 417-420.
- Chung, D., Dorigo, W., Hahn, S., Melzer, T., Paulik, C., Reimer, C., Vreugdenhil, M., Wagner, W. y Kidd, R. (2018) *ESA Climate Change Initiative Phase II- Soil*

Moisture. Algorithm Theoretical Baseline Document (ATBD) D2.1 version 04.2: Merging Active and Passive Soil Moisture Retrievals. EODC.

- Comisión Mixta de Sequía (2002) *Plan estratégico de mitigación de los efectos del déficit hídrico sobre la actividad agropecuaria de la región Chorotega, período 2002-2003*. Liberia, Guanacaste, Costa Rica.
- Comité Sectorial Agropecuario Chorotega (2015) *Plan Regional de Desarrollo Agropecuario y Rural 2015-2018*. Costa Rica: Sistema de Información del sector agropecuario costarricense, InfoAgro.
- Comité Sectorial Regional Agropecuario Región Chorotega (2007) *Plan regional de desarrollo sector productivo Chorotega*. Guanacaste, Costa Rica: sector productivo.
- Cooley, S.S., Williams, C.A., Fisher, J.B., Halverson, G.H., Perret, J. y Lee, C.M. (2018) “Assesing regional drought impacts on vegetation and evapotranspiration: a case study in Guanacaste, Costa Rica”, *Ecological applications*, 0(0), pp. 1-21.
- Corporación Arrocera Nacional (2015) *Informe estadístico período 2014-2015*. Costa Rica: CONARROZ, Unidad de inteligencia de mercados.
- Correa, A., Birkel, C., Gutierrez, J., Dehaspe, J., Durán-Quesada, A. M., Soulsby, C. y Sánchez-Murillo, R. (2020) “Modelling non-stationary water ages in a tropical rainforest: A preliminary spatially distributed assessment”, *Hydrological Processes*, 34(25), pp. 4776-4793.
- Coto Hernández, M. (2016) “Paacume: más que un proyecto de infraestructura, un proyecto de desarrollo”, *Ambientico*, 260, pp.32 – 37.
- Dehaspe, J., Birkel, C., Tetzlaff, D., Sánchez-Murillo, R., Durán-Quesada, A. M. y Soulsby, C. (2018) “Spatially distributed tracer-aided modelling to explore water and isotope transport, storage and mixing in a pristine, humid tropical catchment”, *Hydrological Processes*, 32(21), pp. 3206-3224.
- Diouf, O. C., Weihermüller, L., Ba, K., Faye, S. C., Faye, S. y Vereecken, H. (2016) “Estimation of Turc reference evapotranspiration with limited data against the Penman-Monteith Formula in Senegal”, *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, 110(1), pp. 117-137.
- Donohue, R. J., McVicar, T. R. y Roderick, M. L. (2010) “Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate”, *Journal of Hydrology*, 386(1-4), pp. 186-197.

- Dunn, S.M. y Mackay, R. (1995) "Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology", *Journal of Hydrology*, 171, pp. 49-73.
- Elizondo, Q, A., González, P, A. y Quesada, V. D. (2016) *Propuesta de comercialización de servicios para el Instituto Meteorológico Nacional*. Tesis de licenciatura. Costa Rica, Escuela de Administración de Negocios, Universidad de Costa Rica.
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Khabba, S., Simonneaux, V., Jarlan, L., Ouldbba, A., Rodriguez, J.C. y Allen, R. (2010) "Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: can weather forecast data be used as alternate of ground meteorological parameters?", *Journal of Arid Environments*, 74(12), pp. 1587-1596.
- Fisher, J. B., Whittaker, R. J. y Malhi, Y. (2011) "ET come home: potential evapotranspiration in geographical ecology", *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), pp. 1-18.
- Food and agriculture organization of the United Nations (FAO) (2018) *Land y water: sugarcane*. Disponible en <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/sugarcane/en/> [Consultado 22-07.2018].
- Fournier O, L.A. (1969) "Estudio preliminar sobre la floración en el roble de sabana, *Tabebuia pentaphylla* (L.) Hemsl", *Revista Biología Tropical*, 15 (2), pp. 259-267.
- Goddard Earth Science Data and Information Service Center (GES DISC) (n.d.) *LPRM_TMI_SOILM2: TMI/TRMM Surface soil moisture (LPRM) L" V001c*. Disponible en https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/LPRM_TMI_SOILM2_001/summary [Consultado 20-10-2020].
- González-Dugo, M. P., Chen, X., Andreu, A., Carpintero, E., Gómez-Giráldez, P. y Su, Z. (2017) "Evolución de la evapotranspiración y el estrés hídrico de la vegetación de dehesa en la Península Ibérica (2001-2015)", *Revista de Teledetección*, 50, pp. 27-36.
- González Villareal, C. y Vilaboa, R. (2010) *Informe final de investigación: Tendencias del desarrollo en el cantón de Santa Cruz, Guanacaste. Período 1979 – 2009*. Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia, Instituto de Formación y Capacitación Municipal y de desarrollo local.

- Green, J.K., Konings, A.G., Alemohammad, S.H., Berry, J., Entekhabi, D., Kolassa, J., Lee, J.E. y Gentine, P. (2017) “Regionally strong feedback between the atmosphere and terrestrial biosphere”, *Nature Geoscience*, 10, pp. 410-417.
- Hargreaves, G.H. (1994) “Defining and using reference evapotranspiration”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(6), pp. 1132-1139.
- Hargreaves, G.H. y Samani, Z.A. (1985) “Reference crop evapotranspiration from temperature”, *Applied Engg. Agric., ASAE*, 1, 2, pp. 96-99.
- Hayes, M.J., Svoboda, M.D., Wilhite, D.A. y Vanyarkho, O.V. (1999) “Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index”, *Bulletin of the American meteorological society*, 80(3), pp. 429-438.
- Hernández Contreras, José Luis (n.d.) *Informe final de labores dirección regional Chorotega*. Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería, servicio de salud animal.
- Hidalgo, H.G., Alfaro, E.J., Amador, J.A. y Bastidas, A. (2019) “Precursors of quasi-decadal dry-spell in the Central America Dry Corridor”, *Climate Dynamics*, 53, pp. 1307-1322
- Hidalgo, H.G., Alfaro, E.J. y Quesada-Montano, B. (2017) “Observed (1970-1999) climate variability in Central America using a high-resolution meteorological dataset with implication to climate change studies”, *Climate Change*, 141(1), pp. 13-28.
- Hidalgo, H.G., Cayan, D.R. y Dettinger, M.D. (2005) “Sources of Variability of Evapotranspiration in California”, *Journal of Hydrometeorology*, 6, pp. 3-19.
- Hurtado, G. y Cadena, M. (2002). “Aplicación de índices de sequía en Colombia”, *Meteorología Colombiana*, (5), pp. 131–137.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (2015) *VI Censo Nacional Agropecuario: Características de las fincas y de las personas productoras*. Costa Rica: INEC.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (2017) *Encuesta Nacional de hogares 2017: resultados generales*. San José, Costa Rica: INEC.
- Ji, L. y Peters, A.J. (2003). “Assesing vegetation responde to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices”, *Remote Sensing of Environmental*, 87, pp. 85-98.

- Koster, R. D., Dirmeyer, P. A., Guo, Z., Bonan, G., Chan, E., Cox, P., Gordon, C.T., Kanae, S., Kowalczyk, E., Lawrence, D., Liu, P., Lu, C.H., Malyshev, S., McAvaney, B., Mitchell, K., Mocko, D., Oki, T., Oleson, K., Pitman, A., Sud, Y.C., Taylor, C.M., Verseghy, D., Vasic, R., Xue, Y. y Yamada, T. (2004) “Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation”, *Science*, 305(5687), pp. 1138-1140.
- Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) (n.d.) *MYD13Q1 v006: MODIS/Aqua Vegetation Indices 16 – Day L3 Global 250 m SIN Grid*. Disponible en: <https://lpdaac.usgs.gov/products/myd13q1v006/6> [Consultado 19-10-2020].
- Larios S, G.I. (2010) *La quema de la caña de azúcar en Guanacaste, impacto ambiental. Deber del estado de disminuir sus efectos*. Tesis para optar al grado de licenciada en Derecho. Universidad de Costa Rica.
- Level-1 and Atmosphere Archive y Distribution System Distributed Active Archive Center (LAADS DAAC) (n.d.) *MOD13C2 – MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05 Deg CMG*. Disponible en <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD13C2/> [Consultado 19-10–2020]
- Liou, Y.A. y Kar, S. (2014) “Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms – A review”, *Energies*, 7(5), pp. 2821-2849.
- Liu, Y., Zhuang, Q., Pan, Z., Miralles, D., Tchebakova, N., Kicklighter, D., Chen, J., Sirin, A., He, Y., Zhou, G. y Melillo, J. (2014) “Response of evapotranspiration and water availability to the changing climate in Northern Eurasia”, *Climatic change*, 126(3-4), pp. 413-427.
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., García-Ruiz, J. M., Portela, M. M. y Almeida, A. B. (2009) “Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: The Lower River Tagus, Spain and Portugal”, *Water Resources Research*, 45(2).
- Lu, J., Sun, G., McNulty, S. G. y Amatya, D. M. (2005) “A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States”, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(3), pp. 621-633.
- Maherali, H., Pockman, W. T. y Jackson, R. B. (2004) “Adaptive variation in the vulnerability of woody plants to xylem cavitation”, *Ecology*, 85(8), pp. 2184-2199.

- Maidment, D. R. (1993) *Handbook of hydrology* (No. 631.587). McGraw-Hill.
- Maldonado, T., Rutgersson, A., Alfaro, E., Amador, J. y Claremar, B. (2016) “Interannual variability of the midsummer drought in Central America and the connection with sea surface temperatures”, *Advances in Geosciences*, 42, pp. 35-50.
- Maliva, R. y Missimer, T. (2012) *Arid Lands Water Evaluation and Management*. Springer Science y Business Media.
- Magaña, V., Amador, J.A. y Medina, S. (1999) “The Midsummer Drought over Mexico and Central America”, *American Meteorological Society*, 12, pp. 1577-1588.
- Mantua, N.J. y Hare, S.R. (2002) “The Pacific Decadal Oscillation”, *Journal of Oceanography*, 58, pp. 35-44.
- Martens, B., Waegeman, W., Dorigo, W. A., Verhoest, N. E. y Miralles, D. G. (2018) “Terrestrial evaporation response to modes of climate variability”, *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 1(1), pp. 1-7.
- McCabe, M.F., Miralles, D.G., Holmes, T.R. y Fisher, J.B. (2019) “Advances in the Remote Sensing of Terrestrial Evaporation”, *Remote Sens*, 1138.
- Meneses – Tovar, C.L. (2011) “El índice normalizado diferencial de vegetación como indicador de la degradación del bosque”, *Unasyva*, 238, pp. 39-45.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (2010) *Documento D-02: Caracterización biofísica de las zonas definidas para la implementación de las opciones de cosecha de agua*. Costa Rica: MAG.
- Ministerio de Planificación Nacional y Política económica (2018) *Índice de Desarrollo Social 2017*. San José, Costa Rica: MIDEPLAN, Área de análisis del desarrollo.
- Miralles, D., Gentile, P., Seneviratne, S.I. y Teuling, A.J. (2019) “Land-atmospheric feedbacks during droughts y heatwaves: state of the science and current challenges”, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436 (1), pp. 1-17.
- Montheith, J.L. (1965) “Evaporation and environment, in the state and movement of water in living organisms”, *Symp. Soc. Exp. Biol*, pp. 205-234. Academic Press.
- Mora Alvarado, D. y Portuguez, C.F. (2012) *Calidad del agua en sus diferentes usos en Guanacaste – Costa Rica al año 2011*. San José, Costa Rica: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.

- Morales A, N. y Román F, M. (2017) *Análisis de la situación socioeconómica de la región Chorotega como aproximación de sus resultados en pobreza en 2015 y 2017: informe final*. San José, Costa Rica: PED-PNUD.
- Moss, R., Edmonds, J., Hibbard, K., Manning, M., Rose, S., van Vuuren, D., Carter, T., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G., Mitchell, J., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S., Stouffer, R., Thomson, A., Weyant, J. y Wilbanks, T. (2010) “The next generation of scenarios for climate change research and assessment”, *Nature*, 463, pp 747-756.
- Muñoz Jiménez, R. G. (2019) *La sequía meteorológica provocada por El Niño y algunos de sus efectos en el sector turismo: América Central, 1950-2014*. Tesis de licenciatura. Costa Rica, Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica.
- National Center for Atmospheric Research University Corporation for Atmospheric Research (NCAR UCAR) (2020) *Climate Data Guide: GRACE: Gravity Recovery and Climate Experiment: surface mass, total water storage, and derived variables*. Disponible en <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/grace-gravity-recovery-and-climate-experiment-surface-mass-total-water-storage-and#:~:text=The%20Gravity%20Recovery%20and%20Climate,themselves%20due%20to%20gravitational%20acceleration>. [Consultado 20-10-2020].
- Orzolek, D; Bogash, S.M; Kime, L.F. y Harper, K. (2006) “Cantaloupe production”, *Agricultural Alternatives*. Disponible en <https://extension.psu.edu/cantaloupe-production> [Consultado 22-07-2018].
- Otkin, J.A., Anderson, M.C., Hain, C. and Svoboda, M. (2015) “Using temporal changes in drought indices to generate probabilistic drought intensification forecasts”, *Journal of Hydrometeorology*, 16(1), pp.88-105.
- Otkin, J.A., Svoboda, M., Hunt, E.D., Ford, T.W., Anderson, M.C., Hain, C. y Basara, J.B. (2018) “Flash droughts: A review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(5), pp.911-919.
- Otkin, J.A., Zhong, Y., Hunt, E.D., Basara, J., Svoboda, M., Anderson, M.C. y Hain, C. (2019) “Assessing the evolution of soil moisture and vegetation conditions during a flash drought–flash recovery sequence over the South-Central United States”, *Journal of Hydrometeorology*, 20(3), pp.549-562.
- Palmer, Wayne C. (1965) “Meteorological Drought”, *US Weather Bureau research paper*, (45).

- Pendergrass, A.G., Meehl, G.A., Pulwarty, R., Hobbins, M., Hoell, A., AghaKouchak, A., Bonfils, C.J., Gallant, A.J., Hoerling, M., Hoffmann, D. y Kaatz, L. (2020) “Flash droughts present a new challenge for subseasonal-to-seasonal prediction”, *Nature Climate Change*, 10(3), pp.191-199.
- Perry, S. J., McGregor, S., Gupta, A. S. y England, M. H. (2017) “Future changes to El Niño–Southern Oscillation temperature and precipitation teleconnections”, *Geophysical Research Letters*, 44(20), pp. 10-608.
- Priestley, C.H.B. y Taylor, R.J. (1972) “On the assessment of Surface heat flux and evaporation using large scale parameters”, *Mon. Wea. Rev.*, 100, pp. 81-92.
- Programa Estado de la Nación (2000) *VI informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación.
- Programa Estado de la Nación (2017) *XXIII informe Estado de la Nación en Desarrollo humano sostenible*. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación.
- Ramírez, P. (1983) “Estudio meteorológico de los veranillos en Costa Rica”. *Nota de investigación*, 5.
- Ramírez Villegas, G. y Jiménez García, J. (1998) *Diagnóstico general de la situación actual de los recursos hídricos en la provincia de Guanacaste. Guanacaste – Costa Rica*. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados: Cuencas hidrográficas.
- Ravelo, A., Planchuelo, A., Aroche, R., Douriet Cárdenas, J., Alegría, M., Jimenez, R., Maureira, H., Peña Paz, T., Tiscornia, G., Zanvetor, R. y Zimmermann, R. (2016) *Monitoreo y evaluación de las sequías en américa central. Estudio de caso: Corredor seco de El salvador, Honduras, Nicaragua*. Unión Europea: EUROCLIMA.
- Rind, D., Goldberg, R., Hansen, J., Rosenzweig, C. y Ruedy, R. (1990). “Potential evapotranspiration and the likelihood of future drought”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95(D7), pp. 9983-10004.
- Rutter, A., Kershaw, K., Robins, P. y Morton, A. (1972) “A predictive model of rainfall interception in forest, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine”, *Agric. Meteorol*, 9, pp. 367-384.
- Sánchez, S. (1990) “Desastres por Inundaciones y sus Daños Potenciales en Guanacaste, Costa Rica”, *Revista Geográfica*, (112), pp. 5-39.

- Sanderson, M. (1992) *UNESCO Sourcebook in Climatology for Hydrologists and Water Resource Engineers (N°551.5 U56)*. UNESCO, Paris.
- Sandhu, H.S., Singh, M.P., Gilbert, R.A., Subiros-Ruiz, F., Rice, R.W. y Shine Jr, J.M. (2017) “Harvest management effects on sugarcane growth, yield and nutrient cycling in Florida and Costa Rica”, *Field Crops Research*, 214, pp.253-260.
- Shuttleworth, W.J. y Calder, I.R. (1979) “Has the Priestley-Taylor Equation Any Relevance to Forest Evaporation?”, *Journal of applied meteorology*, 18, pp. 639-646.
- Simunek, J., Sejna, M., Saito. H., Sakai. M. y Van Genuchten, M. Th. (2009) “The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media”, *University of California-Riverside Department of environmental sciences*.
- Solís Cordero, M. (2017) “Región Chorotega se ubica entre las zonas rurales del país con menores niveles de pobreza” *Periódico Mensaje*, 24 de noviembre. Disponible en <https://www.periodicomensaje.com/guanacaste/2067-region-chorotega-se-ubica-entre-las-zonas-rurales-del-pais-con-menores-niveles-de-pobreza> [Consultado 30-07-2018]
- Sruthi, S. y Aslam, M. (2015) “Agricultural drought analysis using the NDVI and land surface temperature data; a case study of Raichur district”, *Aquatic Procedia*, 4, pp. 1258-1264.
- Trajkovic, S. y Kolakovic, S. (2009) “Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions”, *Water Resources Management*, 23(14), pp. 3057-3067.
- Thorntwaite, C. W. (1948) “An approach toward a rational classification of climate”, *Geographical Review*, 38, pp. 55–94.
- Turc, L. (1961) “Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date”, *Annals of Agronomy*, 12, pp. 13-49.
- Van der Tol, C. y Parodi, G.N. (2012) “Guidelines for remote sensing of evapotranspiration”, *Evapotranspiration-Remote Sensing and Modeling*. IntechOpen.
- Van Loon, A.F. (2013) *On the propagation of drought: how climate and catchment characteristics influence hydrological drought development and recovery*. PhD thesis. Wageningen University, Wageningen, NL
- Van Loon, A.F. (2015) “Hydrological Drought explained”, *WIREs Water*, 2, pp. 359-392.

- Van Loon, A.F. y Laaha, G. (2015) “Hydrological Drought severity explained by climate and catchment characteristics”, *Journal of hydrology*, 526, pp. 3-14.
- Van Loon, A.F., Van Huijgevoort, M.H.J. y Van Lanen, H.A.J. (2012) “Evaluation of drought propagation in an ensemble mean of large-scale hydrological models”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11), pp.4057-4078.
- Van Loon, A. F. y Van Lanen, H. A. J. (2012) “A process-based typology of hydrological drought”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), pp 1915 - 1946.
- Van Loon, A. F., Stahl, K., Di Baldassarre, G., Clark, J., Rangecroft, S., Wanders, N., Glesson, T., Van Dijk, A.I.J.M., Tallaksen, L.M., Hannaford, J., Uijlenhoet, R., Teuling, A.J., Hannah, D.M., Sheffield, J., Svodoba, M., Verbeiren, B., Wagener, T. y Van Lanen, H.A.J. (2016) “Drought in a human-modified world: reframing drought definitions, understanding, and analysis approaches”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, pp. 3631-3650.
- Vargas, G. (2006) *Geografía de Costa Rica*. San José, Costa Rica: EUNED.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., y López-Moreno, J. I. (2010) “A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index”, *Journal of climate*, 23(7), pp. 1696-1718.
- Vicente-Serrano, S.M., Schrier, G.V.d., Beguería, S., Azorin-Molina, C., Lopez-Moreno, y Juan-I. (2014) “Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates”, *Journal of Hydrology*, 526, pp. 42-54.
- Villalobos, R. (1999) *Impacto del fenómeno ENSO sobre la producción de arroz y frijol en dos regiones agrícolas de Costa Rica*. Instituto Meteorológico Nacional. Gestión de Desarrollo. San José, Costa Rica.
- Villalobos, R.; Retana, J.; Zúñiga, B. y Ríos, A. (1997) *Pronóstico de la precipitación total anual para la Región Chorotega mediante un método de asociación de grupos de años*. Informe Técnico N°5. Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica.
- Vision on Technology (VITO) (2014-2017) *Product distribution portal*. Disponible en <http://www.vito-eodata.be/PDF/portal/Application.html#Home> [Consultado 23-11-2017].
- World Meteorological Organization (WMO). (2012) *Standardized Precipitation Index User Guide*. Switzerland: WMO.

- Wu, H., Svoboda, M. D., Hayes, M. J., Willhite, D. A. y Wen, F. (2007) “Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons”, *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(1), pp. 65-79.
- Xu, C. Y. y Singh, V. P. (2001) “Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation”, *Hydrological processes*, 15(2), pp. 305-319.
- Yang, Q., Ma, Z., Zheng, Z. y Duan, Y. (2017) “Sensitivity of potential evapotranspiration estimation to the Thornthwaite and Penman–Monteith methods in the study of global drylands”, *Advances in Atmospheric Sciences*, 34(12), 1381-1394.
- Yun, K. S., Lee, J. Y., Timmermann, A., Stein, K., Stuecker, M. F., Fyfe, J. C. y Chung, E. S. (2021) “Increasing ENSO–rainfall variability due to changes in future tropical temperature–rainfall relationship”, *Communications Earth y Environment*, 2(1), pp. 1-7.
- Zhao, M. y Running, S. W. (2010) “Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009”, *Science*, 329(5994), pp. 940-943

ANEXOS

ANEXO 1. Datos meteorológicos

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	UBICACIÓN	PCP	PERÍODO	TEMP	PERÍODO	% DATOS FALTANTES		
	° N	° W	m.s.n.m.						PCP	TMAX	TMIN
CR00000018	10.15	-85.45	122	NICOYA EXTENSION AGRICOLA	√	1949 - 2013	√	1938 - 1987	4.37	48.78	54.93
CR00000032	10.26	-85.58	56	SANTA CRUZ	√	1949 - 2010	√	1971 - 1996	6.99	21.65	15.41
CR00000033	10.6	-85.54	69	LLANO GRANDE, LIBERIA	√	1957 - 2017	√	1973 - 2017	12.64	12.56	12.24
CR00000036	10.53	-85.25	96	BAGACES	√	1974 - 2015	x	-	1.48	100.00	100.00
CR00000096	10.41	-85.46	14	HDA EL VIEJO WETLANDS, FILADELFIA, CARRILLO	√	1972 - 1987	√	1972 - 1987	45.88	46.39	53.58
CR00000102	10.15	-85.45	122	NICOYA	√	1970 - 1987	√	1970 - 1987	28.05	29.19	87.95
CR00000104	10.15	-85.45	122	NICOYA	√	1979 - 1986	√	1979 - 1986	6.40	7.60	100.00
CR00000114	10.26	-85.58	56	BARRIO PEPE LUJÁN, SANTA CRUZ	√	1972 - 1987	√	1972 - 1987	38.55	39.36	92.62
CR00000115	10.83	-85.61	278	ÁREA DE CONSERVACIÓN SANTA ROSA	√	1972 - 1973	√	1972 - 1973	1.37	32.28	81.81
CR00000116	10.33	-85.2	7	TABOGA, CAÑAS	√	1972 - 1973	√	1972 - 1973	9.85	38.99	75.38
CR00000117	10.46	-84.98	465	TILARÁN	√	1972 - 1983	√	1972 - 1983	42.30	46.02	95.37
CR00000122	10.41	-85.03	364	CAÑAS	√	1970 - 2011	√	1970 - 2011	12.55	13.33	13.80
CR00000129	10.11	-85.32	84	FINCA LA CEIBA, PUEBLO VIEJO, NICOYA	√	1999 - 2020	√	1999 - 2020	4.25	4.21	4.31
CR00000131	10.59	-85.55	82	AEROPUERTO, LIBERIA	√	1998 - 2020	√	1998 - 2020	2.97	3.94	4.31
CR00000132	10.29	-85.59	43	SANTA CRUZ	√	1995 - 2020	√	1995 - 2020	8.14	8.26	8.74
CR00000133	10.45	-85.17	33	HDA. MOJICA, BAGACES	√	1999 - 2020	√	1999 - 2020	5.51	6.87	7.00
74006	10.42	-85.47	14	LA GUINEA, FILADELFIA, CARRILLO	√	1969 - 2010	√	1970 - 2007	10.54	5.71	6.81
76041	10.35	-85.18	8	INGENIO TABOGA, CAÑAS	√	1984 - 2014	√	1984 - 2014	1.04	16.51	22.03
72135	9.91	-85.64	14	PLAYA GARZA, NICOYA	√	1991 - 2014	√	1992 - 2013	28.26	20.59	20.00
76002	10.45	-84.97	562	TILARÁN	x	-	√	1949 - 2007	100.00	24.81	37.39
76005	10.43	-85.09	96	CAÑAS, LA PACÍFICA	x	-	√	1949 - 1995	100.00	41.22	44.45
76008	10.35	-85.18	8	TABOGA, CAÑAS	x	-	√	1970 - 1984	100.00	4.99	4.53
72106	10.84	-85.7	293	P.N SANTA ROSA	√	1971 - 2017	x	-	11.50	100	100
72129	10.92	-85.73	43	MURCIÉLAGO	√	1994 - 2017	x	-	1.90	100	100
74002	10.44	-85.55	23	FILADELFIA, CARRILLO	√	1949 - 1971	x	-	0.05	100	100
74008	10.49	-85.41	35	PELON DE LA BAJURA, LIBERIA	√	1968 - 2019	x	-	14.44	100	100
74037	10.57	-85.39	123	FINCA LAS HUACAS, LIBERIA	√	1986 - 2019	x	-	6.16	100	100
76016	10.41	-85.2	19	HDA MOJICA, PARTICULAR	√	1973 - 2001	x	-	0.33	100	100

ANEXO 2. Presupuesto

Rubro	Costo Unitario	Total
Recurso humano		
Geógrafos (3)	\$441.46	\$15,647.38
Dirección tesis y lectores	No se incluye	
Programador (1)	\$25	\$1,200
Servicios no personales		
Uso de software (ArcGIS)	\$4,800	\$4,800
Uso de software (Matlab)	\$550	\$550
*Datos (IMN)	\$82	\$104,242
Datos (NDVI)	No se incluye	
Datos (CHIRPS)	No se incluye	
Datos (modelo IsoRSM)	No se incluye	
Datos (cobertura)	No se incluye	
Materiales		
Computadora	\$1,200	\$1,200
Disco duro	\$300	\$300
Total	\$7,398.03	\$127,938.96

Fuente: *Elizondo et al., 2016.
Elaboración propia.

ANEXO 3. Modelo de partición simple

Previo al desarrollo con el modelo acoplado con LAI se hizo una evaluación con el modelo hidrológico de simulación desarrollado por Aguilar et al., 2018, para la estimación del caudal en una cuenca. El modelo fue desarrollado mediante un código R partiendo de los valores de precipitación y ET_0 como entradas, tres reservorios y diferentes flujos son considerados para la simulación del caudal o flujo base (**Figura 31**).

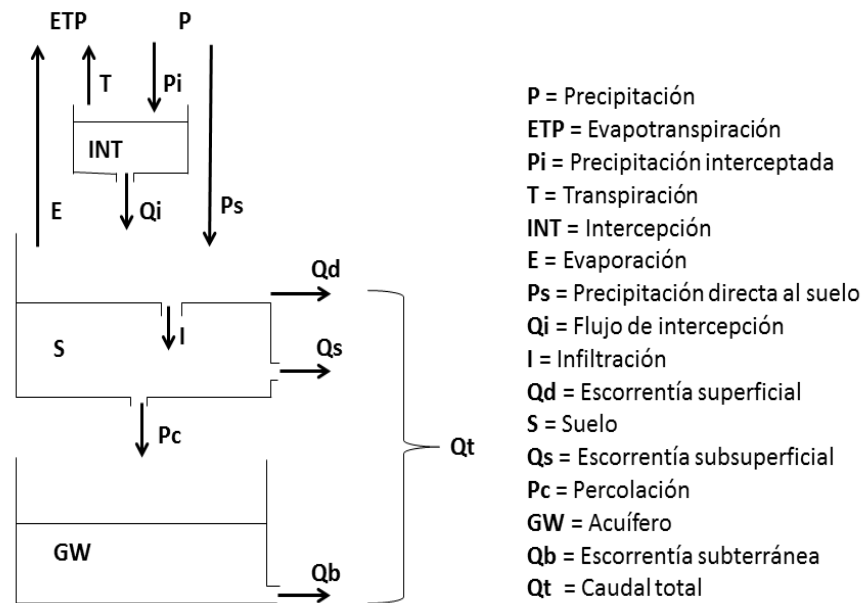


Figura 31. Modelo hidrológico conceptual.
Fuente: Aguilar et al., 2018.

La conceptualización del modelo sugiere la separación de la precipitación registrada en dos flujos: la que es interceptada y la que cae directamente al suelo. La ET_0 también es separada en transpiración y evaporación. Se consideran tres reservorios: la interceptación o agua almacenada temporalmente en el dosel de los árboles; el suelo con infiltración tanto de precipitación directa como del flujo de intercepción y pérdidas ocasionadas por evaporación, flujo lateral y percolación; y el agua subterránea, donde también se considera un flujo de aporte al caudal total. Para la ejecución del modelo se requiere calibrar, con datos de caudal observado, 6 parámetros que varían entre 0 y 1.

A- Calibración del modelo

Se realizó la calibración entre la serie simulada de caudal de la estación de Liberia y los caudales registrados en la estación La Guardia a partir de la información de caudal facilitada por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados para el desarrollo de la investigación de tesis.

Después de calibrar manual y automatizadamente el valor de los parámetros, se logró un coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE, por sus siglas en inglés) de 0.51 que se considera aceptable. De esta manera se obtiene un estimado de la partición para evaluar la relación entre los cambios en la transpiración y los índices de vegetación. El modelo logra capturar el comportamiento estacional interanual, sin embargo, muestra limitación en la captura de los flujos máximos registrados in situ (**Figura 32**).

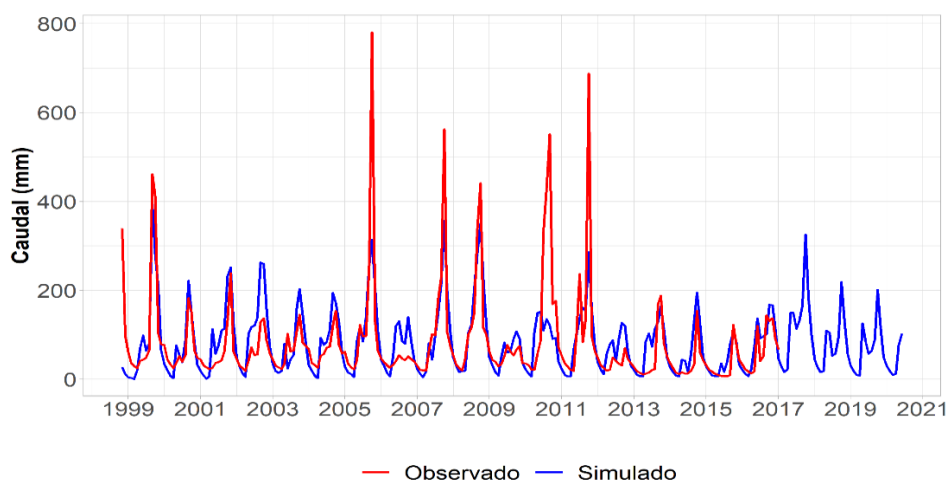


Figura 32. Caudal medio mensual observado (línea roja) y simulado (línea azul), con el modelo de partición simple, para la estación La Guardia, Liberia. Se observa un comportamiento similar, entre las series de caudal, pero, los valores simulados no reproducen los picos más altos registrados. Elaboración propia.

La climatología modelada de la partición sugiere un comportamiento idéntico y el mismo rango de variación entre la precipitación interceptada (**Figura 33** izquierda arriba) y la precipitación directa al suelo (**Figura 33** arriba centro), con diferenciación en los valores acumulados de alrededor de 50 mm de más en la lluvia que cae directamente en superficie. Estas variables responden, en promedio, de forma directa a la influencia del MSD, lo que tiene como implicación que el comportamiento de la precipitación directa al suelo, importante para el sector agrícola, es forzada por el MSD. Algo similar ocurre con la interceptación y el flujo de interceptación en términos del comportamiento anual, aunque los acumulados pueden ser del doble en interceptación respecto al flujo de interceptación y los rangos de variación son ligeramente diferentes durante la mayoría de los meses, en especial durante los primeros meses del año, donde los estimados del flujo de interceptación presentan un promedio cercano a los 20 mm en enero, 7 mm en febrero y de pocos milímetros en marzo y abril (**Figura 33** izquierda abajo).

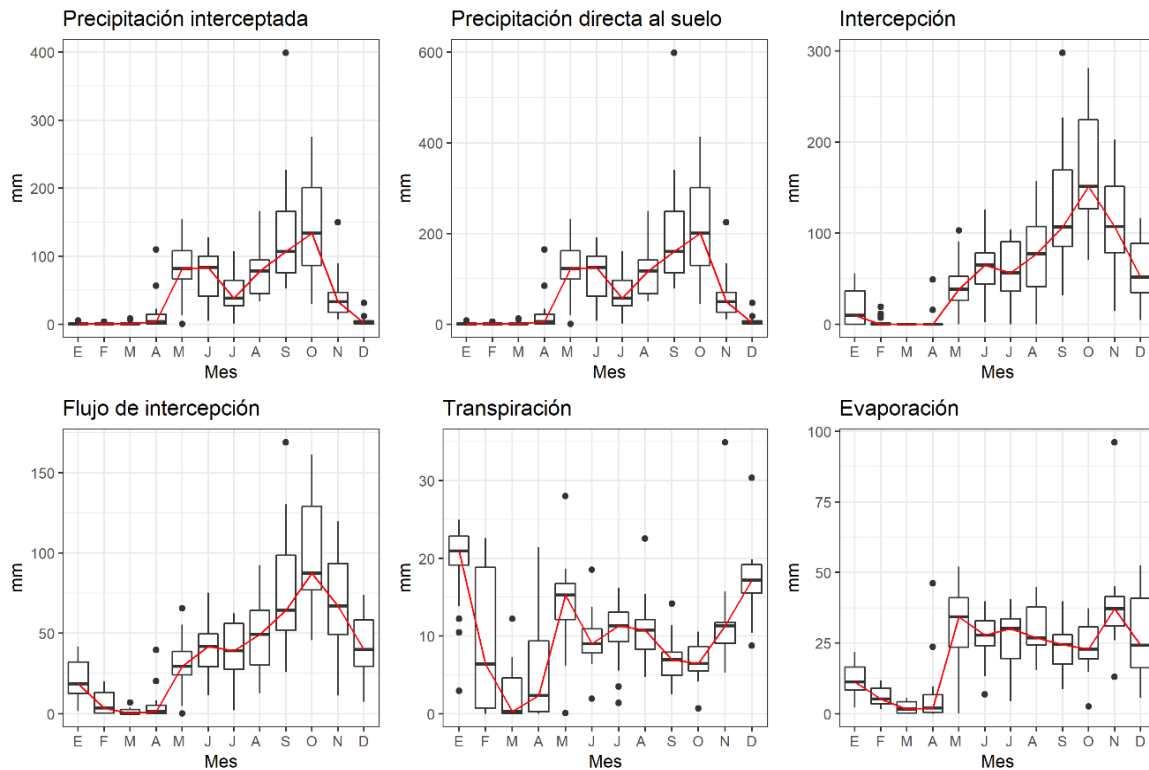


Figura 33. Climatología anual de las variables relacionadas con ET_0 estimadas con el modelo de partición simple para la estación aeropuerto, Liberia. Con excepción de la transpiración, en todas las variables relacionadas con la ET_0 la mayor variabilidad ocurre durante los meses lluviosos. Elaboración propia.

Durante el mes de enero, la intercepción estimada no supera los 20 mm en promedio, y durante los 3 meses siguientes refleja las condiciones de baja precipitación típicas de la época seca (**Figura 33** derecha arriba). En estas dos variables relativas a la intercepción, se observa una ligera disminución durante el mes de julio consistente con la influencia del MSD, como en las dos distinciones relacionadas con la precipitación. Se destaca que tanto la intercepción como el flujo de intercepción muestran un máximo principal durante el segundo semestre del año, lo que sugiere que la intercepción no solo es dependiente del MSD, sino que es modulada por los sistemas que causan la precipitación durante el segundo período del año. Por lo tanto, el desarrollo de sistemas precipitantes forzados por la gran escala como los ciclones tropicales, ondas y complejos convectivos de mesoescala son muy importantes en los controles de la partición de la ET_0 en esta región.

La climatología anual de la transpiración es la más variable (**Figura 33** centro abajo). Al inicio y final del año presenta los estimados más altos, el resto de la temporada seca presenta los valores más bajos con un rango de variación más amplio. En mayo aumenta el promedio acumulado (14 mm), mientras que en el resto de la época lluviosa la transpiración es cercana a los 10 mm con variaciones de 1 a 3 mm entre un mes y otro. Contrario a la mayoría de las

variables consideradas, durante octubre y septiembre se presentan los menores estimados de los meses lluviosos.

El ciclo anual de la evaporación tiene un menor rango de variabilidad comparado con el resto de las variables analizadas (**Figura 33** derecha abajo). Al inicio del año los estimados de evaporación son cercanos a los 12 mm, y se van reduciendo conforme avanza la temporada seca, para mayo aumenta hasta 31 mm en promedio y se mantiene relativamente estable el resto de la temporada lluviosa, con un ligero descenso en junio-julio y durante septiembre-octubre, el pico máximo lo alcanza en noviembre (38 mm).

En términos anuales, los acumulados de evaporación, transpiración y por tanto de la ETP son los más bajos y presentan ligeras variaciones interanuales (**Figura 34**). Los siguientes en magnitud son el flujo de intercepción y la precipitación interceptada, que además presentan una mayor variabilidad durante todo el período de la simulación histórica. La intercepción y la precipitación que cae al suelo presentan los acumulados más significativos por año. En general se observa que estas variables, junto con la precipitación interceptada, son las que están sujetas a la mayor variabilidad interanual.

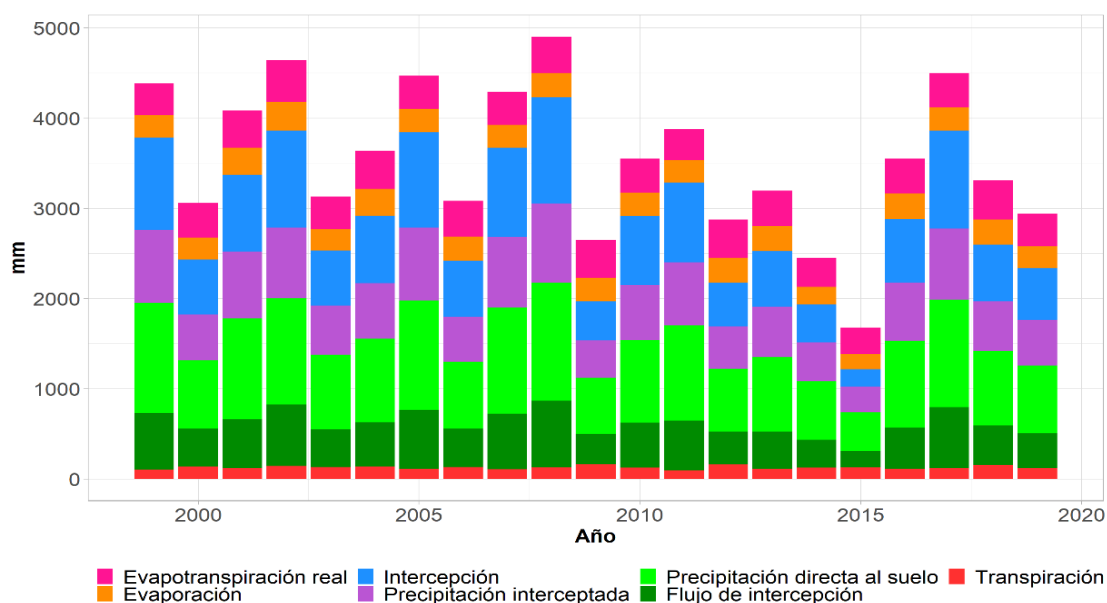


Figura 34. Distribución anual de las variables relacionadas con la ET_0 para la estación aeropuerto, Liberia. Elaboración propia.

En relación con las anomalías de transpiración durante el año 1999 se presentan los dos picos con anomalías negativas de transpiración más importantes de todo el período, en su mayoría todo el año mantuvo anomalías por debajo de cero, con excepción de abril y de noviembre, durante este último se presenta la anomalía positiva de mayor magnitud (**Figura 35**). En el

resto del período se observan algunos extremos, en gran parte de signo positivo que alteran el comportamiento entre -1 y 1. Se pueden destacar algunos periodos donde se experimenta un cambio brusco entre un mes y el otro como la temporada lluviosa del 2015.

Luego de evaluar los resultados del modelo simple, se tomó la decisión de trabajar con un modelo más robusto, por lo que se hizo uso del modelo acoplado con LAI. Aunque se describen los resultados con el modelo acoplado con LAI en el documento principal, se incluye este anexo que documenta la evaluación previa realizada con el modelo de Aguilar et al., (2018).

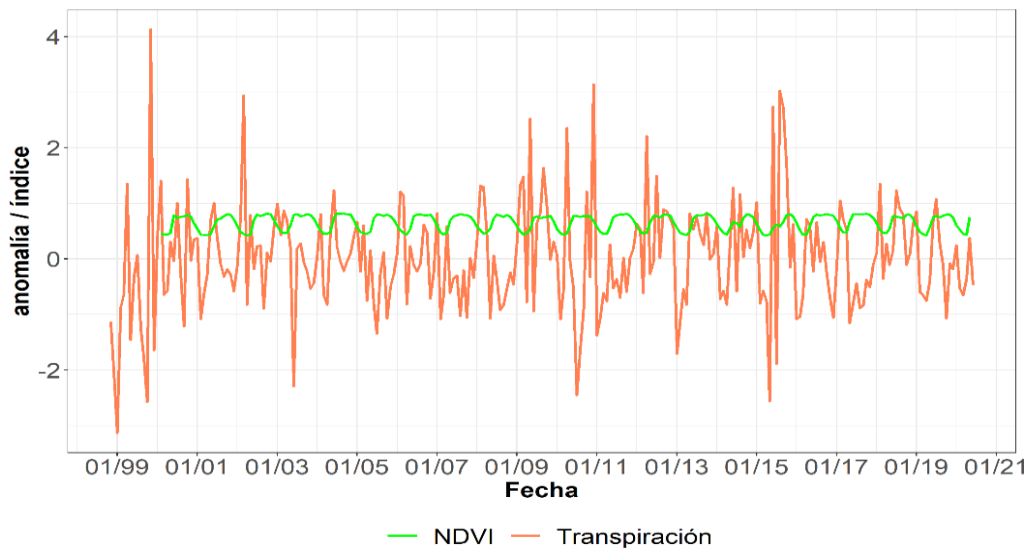


Figura 35. Anomalías de transpiración (línea color rosa) y NDVI (línea color verde) para la estación aeropuerto, Liberia.
Elaboración propia.

B. Influencia del ENOS sobre el comportamiento de la transpiración

La correlación entre la transpiración y el ENOS fue baja y de poca significancia durante la mayoría de los meses. Sin embargo, durante parte del período seco y principalmente durante el segundo período de lluvias, eso cambia y la significancia de la correlación aumenta (**Figura 36**). Febrero es el único mes seco, en el que se obtuvo una correlación negativa con moderada significancia. Mientras que para los meses de junio, agosto, septiembre y octubre la correlación es positiva y significativa. Principalmente en septiembre y octubre se obtienen los valores más altos de correlación.

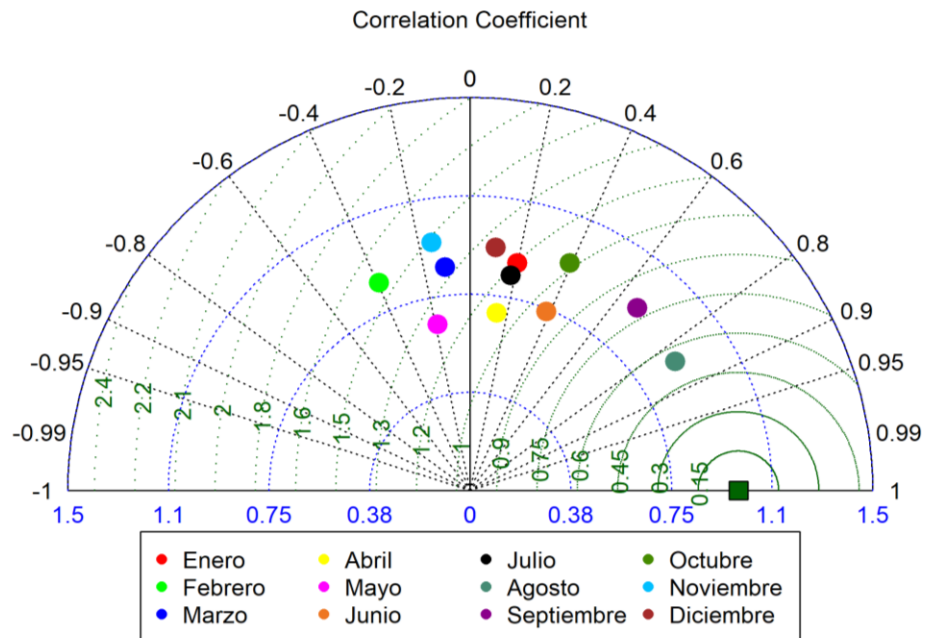
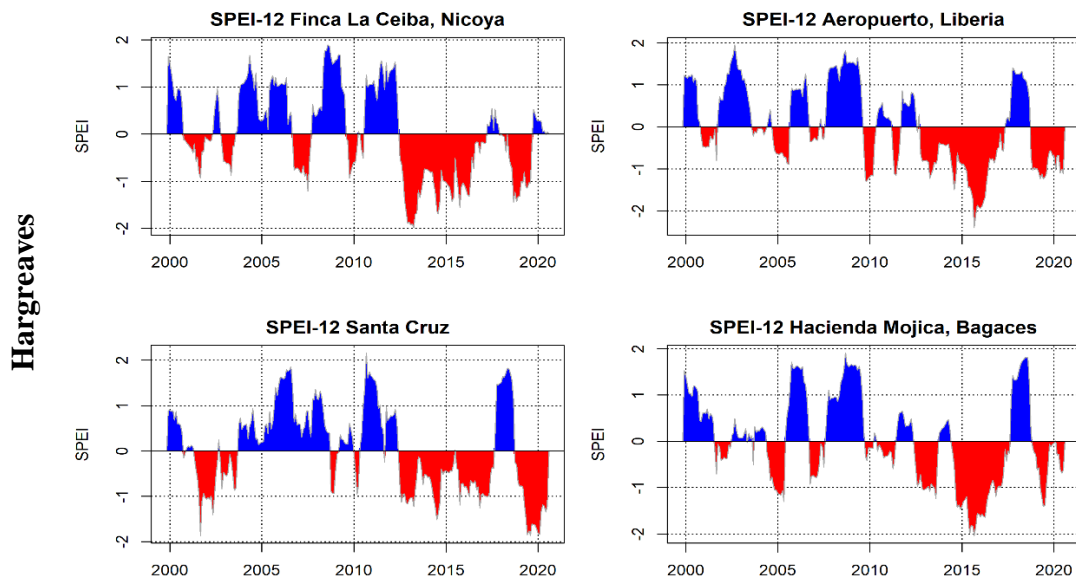
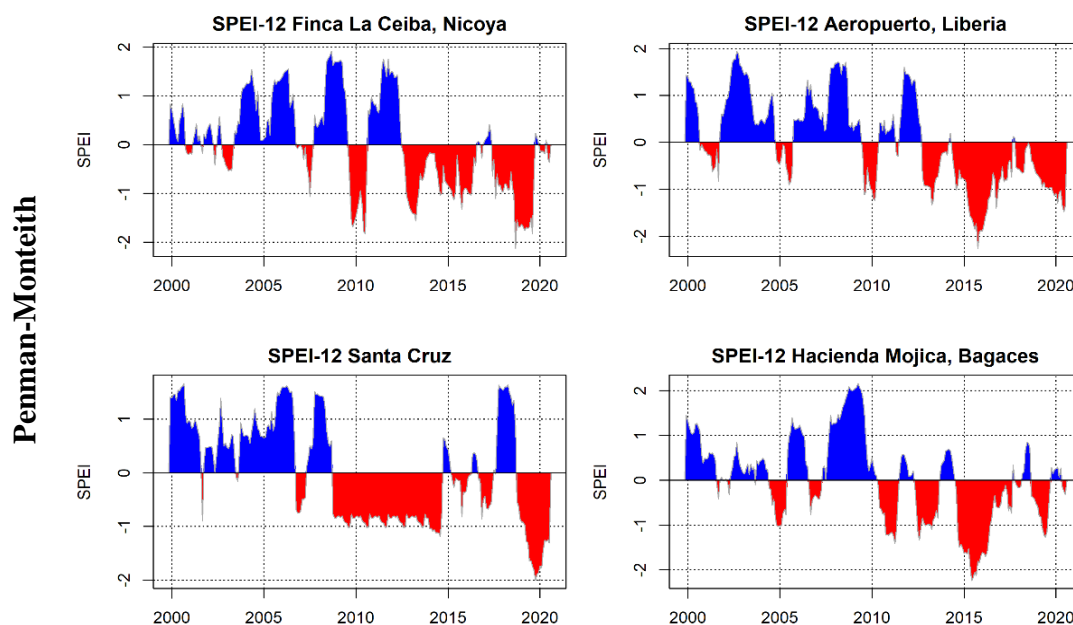


Figura 36. Diagrama de Taylor representativo de la correlación mensual entre las anomalías de transpiración y el MEI en la estación Aeropuerto, Liberia. La influencia del ENOS es de mayor significancia durante agosto y septiembre. Elaboración propia.

ANEXO 4. SPEI-12 de acuerdo a ecuación de ET

La ecuación utilizada para el cálculo de ET_0 afecta las series de SPEI a largo plazo, especialmente en áreas relativamente áridas donde el SPEI es dependiente de las disminuciones en la precipitación (Beguería et al., 2014). Las ecuaciones de Hargreaves y de Penman-Monteith presentan una similitud en los resultados, dada la diferenciación entre la primera (menos seca) y la segunda (más seca) mitad del período analizado, sin embargo, la tendencia es más fuerte y más marcada al utilizar la ecuación de Penman-Monteith.





ANEXO 5. Comparación salidas modelo acoplado para datos in-situ vs proyecciones

El modelo se ejecutó con datos observados y con el registro histórico de las proyecciones de Cabos et al. (2019), observándose una buena correlación entre ambos datos. En cuanto a la transpiración, al modelo ROM le cuesta resolver valores bajos (menores a los 5mm), pero resuelve muy bien los valores más altos. Este resultado implica un buen nivel de confianza en el uso de las proyecciones para la evaluación de la partición del agua.

