

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y SU RELACIÓN CON LA COBERTURA
VEGETAL EN AMÉRICA CENTRAL, DISCREPANCIAS DENTRO Y FUERA DEL CORREDOR SECO
CENTROAMERICANO.

Trabajo final de investigación aplicada sometido a la consideración de la Comisión del
Programa de Estudios de Posgrado en Geografía para optar al grado y título de Maestría
Profesional en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección.

JORGE DANIEL GARCÍA GIRÓN

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2020

DEDICATORIA

Dedico este trabajo y todo el proceso culminado a Dios, por darme el don de la vida, por la salud y la sabiduría. A mis padres y hermano, por brindarme el amor y el apoyo durante toda mi vida para mi desarrollo personal y profesional. Y a mi familia en general en Colombia y en Costa Rica.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento profundo a Dios, por brindarme salud y los medios para culminar esta etapa de mi desarrollo profesional y personal. Agradecimiento profundo a mi familia, mis padres Jorge y Magdalena por ese esfuerzo y amor a lo largo de mi vida para lograr ser una gran persona, a mi hermano Juan David por su apoyo y compañía durante toda mi vida. Agradecimiento a mi tía Clara y mi abuela Olinda, por el apoyo y cariño brindado en todo mi desarrollo profesional.

Agradecimiento al M.Sc. Ing. Maikel Méndez Morales, por brindarme su confianza y apoyo durante el desarrollo de esta investigación en condición de tutor, sus consejos y transmisión de conocimientos tanto como profesor y como tutor aportaron en gran medida a la culminación del presente trabajo. Agradecimiento al Dr. Hugo Hidalgo León, por permitirme desarrollarme académicamente en el ámbito de la investigación científica y por la confianza que me brindo en los años de colaboración en el CIGEFI, por sus consejos y conocimientos compartidos en el desarrollo de los proyectos de investigación y en condición de lector. Agradecimiento al M.Sc. Luis Eduardo Quesada Hernández, por el apoyo y consejos brindados durante la culminación de este trabajo, por el intercambio de conocimientos durante los proyectos de investigación en que participamos y por su disposición a aportar en condición de lector. Agradecimiento al Dr. Yosef Gotlieb, por la confianza y aporte de conocimientos a lo largo de los proyectos de investigación y en el desarrollo de este trabajo.

Finalmente agradecimiento al Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI) de la Universidad de Costa Rica, gestor de los proyectos de investigación a los que estuve vinculado: Vicerrectoría de Investigación, Universidad de Costa Rica. V.I. 805-B7-286 (UCREA), B6-143 y B7-507 (CONICIT-MICITT), B0-810, A4-906 (PESCTMA), B8-766 (Redes Temáticas) y B9-454 (Grupos), Becas del Sistema de Estudios de Posgrado; su apoyo científico, de planta física y financiamiento aportaron en gran medida al desarrollo de esta investigación.

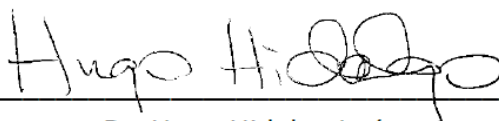
“Este trabajo final de investigación aplicada fue aceptado por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Geografía de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Profesional en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección”



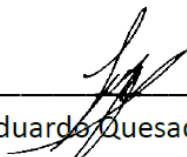
M.Sc. Hubert Vargas Picado
Representante del Decano Sistema de Estudios de Posgrado



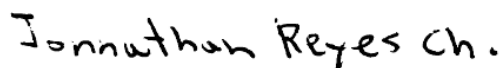
M.Sc. Maikel Méndez Morales
Profesor Guía



Dr. Hugo Hidalgo León
Lector



M.Sc. Luis Eduardo Quesada Hernández
Lector



M.Sc. Jonnathan Reyes Chaves
Representante del Director del Programa de Posgrado



Jorge Daniel García Girón
Sustentante

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	viii
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 INTRODUCCIÓN AL TEMA	2
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA	6
1.3 OBJETIVOS Y PROBLEMA.....	8
1.3.1 Problema	8
1.3.2 Objetivos	9
1.4 DELIMITACIONES.....	9
1.4.1 Zona de estudio	9
1.5 ALCANCES DEL PROYECTO	11
1.6 LIMITACIONES	11
CAPITULO 2. MARCO CONCEPTUAL	13
2.1 Cobertura del suelo y sensores remotos	13
2.2 Relación humedad suelo y cobertura vegetal.....	14
2.3 Relación humedad suelo y precipitación	15
2.4 Relación humedad suelo y temperatura de la superficie	16
2.5 Humedad de suelo y agricultura	16
2.6 Humedad de suelo en geografía	17
2.7 Corredor Seco Centroamericano	18
2.8 Sequía	19

2.9 Clima en América Central.....	20
2.10 Humedad de suelo y sensores remotos.....	21
2.11 Indicadores locales de asociación espacial	23
CAPITULO 3. METODOLOGÍA	25
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	25
3.2 INSTRUMENTOS	25
3.3 PROCEDIMIENTOS.....	28
3.3.1 Objetivo 1. Procesar los datos de humedad de suelo, cobertura, precipitación y temperatura por sub-regiones y municipios	28
3.3.2 Objetivo 2. Identificar correlaciones entre la humedad del suelo y tres tipos de cobertura (bosque, pastos, cultivos) por municipio, diferencias entre regiones (CSC y NO CSC), y patrones de agrupamiento espacial.....	33
3.3.3 Objetivo 3. Contrastar la distribución espacial de la humedad de suelo con las características climáticas, zonas afectadas por sequías y las zonas agroproductivas de América Central	37
CAPITULO 4. RESULTADOS	43
4.1 Objetivo 1. Procesar los datos de humedad de suelo, cobertura, precipitación y temperatura por sub-regiones y municipios	43
4.1.1 Procesamiento de datos, humedad del suelo por estaciones para América Central	43
4.1.2 Procesamiento de datos, coberturas vegetales para América Central	45
4.1.3 Definición de municipios que pertenecen al CSC	47
4.1.4 Estadísticas de zona (media), humedad de suelo por municipio	48
4.1.5 Estadísticas de zona (media), coberturas por municipio	49
4.1.6 Estadísticas de zona (media), precipitación por municipio	50

4.1.7 Estadísticas de zona (media), temperatura de superficie por municipio _____	52
4.2 Objetivo 2. Identificar correlaciones entre la humedad del suelo y tres tipos de cobertura (bosque, pastos, cultivos) por municipio, diferencias entre regiones (CSC y NO CSC), y patrones de agrupamiento espacial.....	53
4.2.1 Correlaciones entre humedad de suelo y cobertura_____	53
4.2.2 Pruebas de hipótesis para la diferenciación estadística entre CSC y NO CSC según municipios _____	55
4.2.3 Patrones de distribución (I moran local al 95% de significancia) _____	61
4.3 Objetivo 3. Contrastar la distribución espacial de la humedad de suelo con las características climáticas, las zonas afectadas por sequías y las zonas agroproductivas de América Central.....	64
4.3.1 Prueba de correlación entre humedad de suelo temperatura y precipitación _	64
4.3.2 Localización de cultivos y zonas menos húmedas de América Central_____	66
4.3.3 Localización de frecuencia de sequías y zonas más secas de América Central _	69
4.3.4 Porcentaje de vulnerabilidad de municipios ante eventos secos_____	71
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____	74
5.1 CONCLUSIONES	74
5.2 RECOMENDACIONES	78
BIBLIOGRAFÍA _____	81
ANEXOS _____	91

RESUMEN

La humedad del suelo es un componente físico que poco se ha estudiado de manera regional en América Central, su importancia radica principalmente en el papel que cumple en el ciclo hidrológico, en los intercambios de energía entre suelo – cobertura – atmósfera y en la productividad agrícola. El Corredor Seco Centroamericano posee características geográficas, climáticas, ecológicas y socioeconómicas particulares, también es afectado de manera más frecuente por fenómenos hidrometeorológicos extremos, por lo que se decidió abordar las diferencias de los patrones espaciales de humedad de suelo y cobertura vegetal entre esta región y el resto de América Central.

La tecnología de percepción remota de carácter activo como el radar permite la obtención de variables físicas como la humedad del suelo en grandes continuidades espaciales, sin interferencia de coberturas y de la atmósfera. Tanto los productos de humedad de suelo de la misión SMAP, como los de cobertura GLC-SHARE, fueron procesados y analizados por medio del lenguaje de programación R y el uso de Sistemas de Información Geográfica de código abierto. Se realizó un análisis geoestadístico para definir zonas de agrupamiento espacial significativas, de humedad del suelo y coberturas vegetales.

Los principales hallazgos sugieren que el comportamiento espacial de la humedad del suelo no está determinado significativamente por la presencia de un tipo en específico de cobertura vegetal, aunque si se observan tendencias de esta relación opuestas entre coberturas de bosque y cultivos, se encuentra también que la región del Corredor Seco Centroamericano difiere significativamente en términos de humedad del suelo y cobertura con el resto de América Central, los patrones espaciales de humedad del suelo poseen una tendencia de valores bajos en la vertiente del Pacífico y valores altos en la vertiente Caribe.

Se observa también una correspondencia directa entre la distribución de las precipitaciones y la humedad del suelo en meses secos, mientras que con la temperatura se presenta una relación negativa a lo largo del año. A su vez las actividades agroproductivas se concentran en las zonas menos húmedas de la región, y por último se establece la vulnerabilidad por municipio a partir de las variables de humedad de suelo, cobertura agrícola y frecuencia de eventos secos.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Repositorios de datos utilizados. _____	27
Tabla 2. Cultivos de mayor importancia en América Central según propósito. _____	39
Tabla 3. Clasificación por deciles según la suma de valores clasificados de 1 a 1197 por orden de mayor a menor porcentaje de cada variable. _____	42
Tabla 4. Pruebas de hipótesis para la diferenciación estadística de la humedad del suelo dentro y fuera del Corredor Seco Centroamericano. _____	56
Tabla 5. Pruebas de hipótesis para la diferenciación estadística de cobertura vegetal dentro y fuera del Corredor Seco Centroamericano. _____	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio, América Central y Corredor Seco Centroamericano. _____	10
Figura 2. Diagrama de flujo con los procedimientos para el procesamiento de los datos establecido en el objetivo 1. _____	32
Figura 3. Ventana de gestor de pesos por contigüidad en GeoDa. _____	33
Figura 4. Vecinos establecidos (naranja) por contigüidad, para una observación espacial (azul). _____	34
Figura 5. Diagrama de flujo del procedimiento para aplicar la autocorrelación espacial I de Moran Local. _____	35
Figura 6. Diagrama de flujo de la serie de procedimientos para llevar a cabo la prueba de correlación entre humedad del suelo y cobertura, así como las pruebas de significancia estadística. _____	37
Figura 7. Diagrama de flujo con los procedimientos para correlacionar las variables de humedad de suelo, temperatura y precipitación. _____	38
Figura 8. Diagrama de flujo con los procedimientos para determinar las zonas más vulnerables a los fenómenos de sequía. _____	40
Figura 9. Porcentaje promedio de humedad del suelo en América Central por estación climatológica boreal. _____	44
Figura 10. Serie temporal, porcentaje promedio de humedad del suelo por región. _____	45
Figura 11. Porcentaje promedio de cobertura de bosques, pastos y cultivos en América Central. _____	46
Figura 12. Municipios fuera y dentro de CSC. _____	48
Figura 13. Porcentajes mensuales promedio de humedad del suelo en los municipios de América Central. _____	49
Figura 14. Porcentajes promedio de cobertura vegetal en los municipios de América Central. _____	50
Figura 15. Precipitación mensual acumulada promedio para 1970 – 2000, en los municipios de América Central. _____	51

Figura 16. Temperatura promedio mensual para 1970 – 2000, en los municipios de América Central.	53
Figura 17. Correlaciones entre tipos de humedad del suelo y cobertura vegetal por mes, según región de estudio.	54
Figura 18. Distribución porcentajes promedio de humedad de suelo según estación climática en municipios, por región.	57
Figura 19. Gráfico de cajas: porcentajes promedio de humedad de suelo según estación climática, por región.	58
Figura 20. Distribución de porcentajes promedio según tipo de cobertura en municipios, por región.	60
Figura 21. Gráfico de cajas: porcentajes promedio según tipo de cobertura, por región.	61
Figura 22. Patrones de distribución espacial de la humedad del suelo por estación en América Central, promedio para el periodo 2015-2019.	62
Figura 23. Patrones de distribución espacial de las coberturas vegetales en América Central.	63
Figura 24. Correlaciones entre humedad del suelo y variables climáticas por mes, según región de estudio.	64
Figura 25. Localización por densidad de área cultivada, de los cultivos más representativos para consumo interno.	67
Figura 26. Localización por densidad de área cultivada, de los cultivos más representativos para exportación.	68
Figura 27. Localización y frecuencia de sequías en América Central.	70
Figura 28. Vulnerabilidad de municipios de América Central a la sequía agrícola.	72
Figura 29. Diagrama de flujo con la propuesta a continuar para validación y proyecciones usando los datos de humedad de suelo, clima, cobertura y evapotranspiración.	80

LISTA DE ABREVIATURAS

AC: América Central

AirMOSS: Airborne Microwave Observatory of Subcanopy and Subsurface

AMSR-2: Advanced Microwave Scanning Radiometer 2

ARM: Atmospheric Radiation Measurement

ASCAT: Advanced Scatterometer

ASTI: Indicadores de Ciencia y Tecnología Agrícola

CIAT: Centro Internacional de Agricultura Tropical

CIOH: Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas

CLLJ: Caribbean Low-Level Jet

CML4: Offline Community Land Model

CSC: Región Corredor Seco Centroamericano

DEM: Digital Elevation Model

DISPATCH: Physical And Theoretical scale Chang

EASE-Grid: Equal-Area Scalable Earth Grids

ENOS: El Niño Oscilación del Sur

ESA: European Space Agency

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

GADM: Global Administrative Boundaries

GLCNMO: Global Land Cover by National Mapping Organizations

GLC-SHARE: Global Land Cover Share Database

GLC2000: Global Land Cover 2000

GWR: Geographic Weighted Regression

LC-CCI: Land Cover Climate Change Initiative

LCCS: Land Cover Classification System

LISA: Local Indicators of Spatial Association

LST: Land Surface Temperature

MODIS: Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

MSD: Mid Summer Drought

NASA: National Aeronautics and Space Administration
NDVI: Normalized Difference Vegetation Index
NO CSC: Región fuera del Corredor Seco Centroamericano
ONG: Organización No Gubernamental
PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PNUMA: Programa Ambiental de las Naciones Unidas
RCP: Representative Concentration Pathway
SIG: Sistema de Información Geográfica
SMAP: Soil Moisture Active Passive
SMOS: Soil Moisture and Ocean Salinity
SPAM: Spatial Production Allocation Model
SVM: Support Vector Machine
SWB: Soil Water Balance Model
WGS84: World Geodetic System 1984
ZCIT: Zona de Convergencia Intertropical



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, Jorge Daniel García Girón, con cédula de identidad 117001568824, en mi condición de autor del TFG titulado DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y SU RELACIÓN CON LA COBERTURA VEGETAL EN AMÉRICA CENTRAL, DISCREPANCIAS DENTRO Y FUERA DEL CORREDOR SECO CENTROAMERICANO

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.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Jorge Daniel García Girón

Número de Carné: B12703 Número de cédula: 117001568824

Correo Electrónico: jorge10d@gmail.com

Fecha: 13 de julio de 2020 Número de teléfono: 88951740

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): M.Sc. Maikel Méndez Morales

JORGE DANIEL GARCIA GIRON (FIRMA)
Firmado digitalmente por JORGE DANIEL GARCIA GIRON (FIRMA)
Fecha: 2020.07.13 11:58:41 -06'00'

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.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN AL TEMA

América Central ha sido afectada por sequías en la última década. Según [Vaqué \(2017\)](#) el fenómeno El Niño ocurrido en 2015 se catalogó como el más severo en los últimos 30 años afectando en mayor parte el Corredor Seco Centroamericano (CSC) con sequías severas, por su parte también los eventos extremos húmedos de precipitación como la depresión tropical Doce-E (2011) han ocasionado desastres en algunas zonas del CSC. Estos fenómenos repercuten en la seguridad alimentaria, la economía agraria de la región, la salud de la población ([Global Water Parntership, 2014](#)), además de problemas serios en el medio ambiente ([Greenpeace, 2017](#)). Es conocido que la humedad del suelo cumple un papel de importancia ya que según la cantidad de agua almacenada puede influir en la intensidad de los daños producidos por la sequía, ya sea en actividades agroproductivas así como en la disponibilidad en los reservorios de agua para consumo humano ([Gocic & Trajkovic, 2014](#)).

El CSC definido por [Van der Zee et al. \(2012\)](#) como una ecorregión del bosque tropical seco de Centroamérica, integra una variedad de ecosistemas con condiciones climáticas, productivas y sociales similares, abarca desde el estado mexicano Chiapas a través de una franja continua por la vertiente pacífica de Centroamérica que en algunos casos se engrosa llegando a partes más centrales del istmo, hasta la provincia de Guanacaste en Costa Rica, además posee fragmentos que se aproximan a la costa Caribe en Honduras; es una región vulnerable a eventos extremos tanto secos como húmedos, en donde la humedad de los suelos es un elemento a considerar en productividad agrícola y seguridad alimentaria, además para la resiliencia a las inundaciones y sequías debido a su función de almacenar y filtrar el agua ([FAO, 2015](#)).

El monitoreo del comportamiento de la humedad del suelo, en continuidades espaciales de gran escala, es un avance tecnológico incipiente pero que prospecta mejorar el entendimiento de fenómenos atmosféricos, hidrológicos, ambientales, edafológicos y

pedológicos. Las mediciones *in situ* de la humedad de suelo tanto superficial como en horizontes más profundos se torna costosa cuando se requieren redes de monitoreo. Por esta razón los registros existentes son muy dispersos ([Lizarazo, 2017](#)). Los avances en sensores remotos de características activas, más específicamente la tecnología radar ha explorado la medición de humedad de suelo a escala global. Misiones como: Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) de la European Space Agency (ESA) y Soil Moisture Active Passive (SMAP) de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) lanzadas en 2009 y 2015 respectivamente, han puesto a disposición datos de humedad de suelo a la comunidad científica con el objetivo de mejorar el entendimiento de los ciclos del agua, detallar los intercambios de energía y carbono, monitoreo de sequías, productividad de cultivos, optimizando pronósticos y prevenir inundaciones.

También los avances en metodologías para la estimación de la humedad de suelo a partir de productos de sensores remotos pasivos, como los ópticos, son aportes para mejorar la resolución espacial de la información de humedad de suelo, debido a que radiómetros pasivos y activos generan información que no es aplicable para estudios de carácter local (resoluciones mayores a 10 kilómetros por píxel) ([Lizarazo, 2017](#)). Técnicas y modelos como: Support Vector Machine (SVM) ([Ahmad et al., 2010](#)), Physical And Theoretical scale Change (DISPATCH) ([Morelo et al., 2016](#)), técnicas de combinación de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y Land Surface Temperature (LST) utilizada por [Wang et al. \(2007\)](#) y el uso de la técnica estadística de regresión random forest partiendo de valores promedios de precipitación, imágenes satelitales y modelos de elevación digital (DEM) utilizado por [Lizarazo \(2017\)](#) son algunos ejemplos de los avances en esta temática.

La cobertura de la tierra en América Central se ha visto notablemente modificada a través del tiempo, más específicamente en los últimos 40 años, entre 1980 y el año 2010 la cobertura forestal ha pasado de ser el 72% a un 42%, la cobertura agrícola pasó de representar un 2% a 12% de área ([Hernández et al., 2011](#)). La disminución de cobertura vegetal de la mano con otras condiciones como el aumento de

temperatura/evapotranspiración y el aumento en la demanda hídrica de los cultivos repercute en gran medida los impactos de eventos secos en la superficie (Bonilla, 2014); estas condiciones hacen necesario contemplar los patrones de cobertura. En la actualidad la disponibilidad de varias fuentes de datos de cobertura del suelo a nivel global permite la integración de la cobertura en análisis de escala regional.

Las técnicas geoestadísticas permiten llevar a cabo análisis del comportamiento espacial de una variable o bien estimarla a partir de otras, siempre y cuando esta posea continuidad espacial (Moral, 2004), entre las técnicas más destacadas se pueden mencionar la interpolación espacial, la autocorrelación espacial, la regresión espacial, los análisis de clúster o dispersiones espaciales, entre otras. En los últimos años los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han implementado gran parte de las técnicas geoestadísticas, también algunos lenguajes de programación como Python y R permiten llevar a cabo tareas en este campo. La humedad del suelo como cualquier variable espacial se puede analizar geoestadísticamente, para América Central se realiza este análisis por primera vez.

El cambio climático coacciona al ser humano para que tome medidas de adaptación, con el fin de hacer un uso incluyente y sostenible de los recursos hídricos en las actividades agropecuarias; entre las recomendaciones más notables se encuentra el monitoreo de humedad del suelo y de las precipitaciones, para de esta manera trasladar o reubicar las actividades agrícolas más susceptibles a zonas con condiciones de humedad en el suelo y precipitación requeridas (CEPAL, 2015). Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (2015) la humedad del suelo se está viendo afectada por los aumentos en la temperatura y los cambios en los regímenes de precipitación; esto es de esperar ya que el elemento suelo hace parte del sistema climático de la Tierra (Gettelman & Rood, 2016).

A partir de los contextos anteriormente descritos se plantea el siguiente tema de investigación:

Distribución espacial de la humedad del suelo y su relación con presencia de cobertura boscosa, herbácea y agrícola; en América Central. Discrepancias entre la región dentro del Corredor Seco Centroamericano y fuera de éste.

En la región existe una carencia de estudios sobre el comportamiento espacial y temporal de la humedad de suelo, incluso como se mencionó anteriormente la recopilación de datos observados es muy limitada, por lo que el acercamiento al estudio de esta variable por medio de productos de sensores remotos es un aporte significativo al conocimiento, además una caracterización a profundidad del CSC por medio de esta variable no se ha demostrado aún hasta la fecha, vacío científico que se agrava dada la dependencia a sistemas de riego para la producción agrícola, donde por ejemplo los agroproductores de subsistencia y los de gran escala que no poseen acceso a sistemas riego o cuerpos de agua en la región, para el año 2019 se experimentaron pérdidas significativas de entre 50 a 75 por ciento en sus cultivos ([GEOGLAM, 2019](#)). Conociendo las condiciones de humedad de suelo en el espacio geográfico se pueden aprovechar de mejor manera los recursos hídricos destinados a riego y producción agropecuaria, así como la planificación para épocas de siembra y selección de cultivos.

En general este proyecto pretende integrar la humedad de suelo en un análisis espacial de carácter regional, donde esta misma variable pueda crear un punto de conexión entre ciencias atmosféricas, ciencias de la tierra y las ciencias sociales. Utilizando los SIG y los datos geoespaciales en repositorios de libre acceso como herramientas, para suministrar y generar información para la región, en los campos de investigación, gestión del riesgo, actividades agroproductivas y planificación territorial.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

En el CSC se han estudiado conjuntamente sus características climáticas, socioeconómicas y ecológicas, de las cuales ha derivado su delimitación geográfica ([Van der Zee et al., 2012](#)), en estos estudios integrales la humedad del suelo es un componente que aporta al análisis de las dinámicas que se dan en la región, pero de la cual no se profundiza ciertamente ya que su enfoque es más hacia los datos de precipitación y temperatura. Los patrones espaciales de la humedad del suelo pueden indicar situaciones de vulnerabilidad ante sequías agrícolas y eventos extremos de precipitación, zonas de mayor o menor evapotranspiración están ligadas a la humedad del suelo, interacciones tipos de cobertura-suelo, el monitoreo temporal de las anomalías en humedad de suelo puede evidenciar fenómenos locales de alteraciones en el ciclo hidrológico, entre otras utilidades físicas, económicas, sociales y ambientales ([Legates et al., 2010](#)).

La particularidad de las sequías en América Central es que su presencia va totalmente ligada al fenómeno ENOS, en donde las anomalías en las precipitaciones determinaran el grado y la duración de la sequía, la cual en raras ocasiones supera los dos meses. Esta condición afecta en mayor medida a las actividades agropecuarias que a los procesos de recarga de agua, ya que por su corta duración la sequía de tipo meteorológico pasa a ser de tipo agropecuario, pero no alcanza a acentuarse para llegar a un nivel de sequía de tipo hidrológica ([Van der Zee et al., 2012](#)). El componente de amenaza y vulnerabilidad también debe ser considerado, ya que cada región, país, departamento y municipio posee características geográficas, culturales y económicas diferentes, por lo que el déficit de lluvias afectara en mayor o menor medida según las características de la unidad espacial. ([Bonilla, 2014](#)).

América Central es una región altamente dependiente de su producción agrícola para satisfacer parte las necesidades alimenticias de su población, esta producción se compone de maíz y frijol. A pesar de ello en la actualidad se depende en gran medida de las importaciones de estos dos productos, en parte por las dificultades climáticas que se han

generado en la región en los últimos años, en la región, solo Nicaragua se abastece al 100% del frijol que produce, mientras que el maíz el 50% del consumo es de producto importado en gran parte de origen Estadounidense (Bonilla, 2014). Desde el punto de vista de la seguridad alimentaria es de interés comprender el comportamiento de las variables que integran el ciclo de producción de determinado cultivo, por lo que el abordaje espacial y temporal de la humedad de suelo puede ser un aporte cuantioso a las determinaciones enfocadas a la producción agrícola en la región, más específicamente a los productos de los cuales depende la seguridad alimentaria y nutricional de la población.

Recientemente estudios desarrollados con métodos de teledetección provenientes de sensores pasivos para el monitoreo de sequías en zonas agrícolas se reducen solo a 4 países del Istmo: Guatemala, Honduras, El Salvador y Nicaragua (Chen *et al.*, 2016; Son *et al.*, 2018), Costa Rica y Panamá no han sido tomados en cuenta, sin embargo también se han visto afectados por impactos a la producción agropecuaria debido a periodos de sequía (Calvo - Solano *et al.*, 2018), por lo cual se ve la necesidad de integrar estos dos países en el análisis regional, ya que presentan similitudes y particularidades socioeconómicas, geofísicas y naturales con respecto a los otros países que si se han estudiado.

Los análisis espaciales que involucran la geoestadística se han venido desarrollando ampliamente gracias al avance tecnológico y la mayor capacidad de procesamiento computacional, lo que permite trabajar con datos de mayor resolución espacial y temporal para obtener resultados más robustos y confiables. Además, el uso de la geoestadística como herramienta para el análisis de distribuciones espaciales de variables naturales es de suma importancia dentro de la toma de decisiones que repercuten al medio ambiente (Moral, 2004).

Por último, para los profesionales en SIG de la actualidad el manejo de distintas plataformas de datos libres o de costo, su diversidad de formatos en los que se encuentran y su debido procesamiento siguiendo parámetros y criterios de confiabilidad y calidad representan un reto para la comunidad científica SIG, ya que es necesario estar la vanguardia de los diferentes avances en manejo de datos geoespaciales, esto constituye una fortaleza y respaldo en sus labores como investigadores, gestores de proyectos, labor profesional entre otras.

1.3 OBJETIVOS Y PROBLEMA

1.3.1 Problema

Considerando los contextos descritos en la justificación se plantea abordar el estudio de la distribución espacial de la humedad de suelo en América Central, analizando las posibles diferencias que se puedan encontrar entre la región CSC y fuera de éste, además como carácter integral se estudiara también la correlación de las mediciones de humedad con la presencia de tres tipos de cobertura: bosques, pastos y cultivos, esto con el objetivo de identificar cambios en cobertura según el comportamiento espacial de la humedad del suelo. Se adopta el siguiente problema de investigación:

¿Qué patrón de distribución espacial posee la humedad superficial del suelo en América Central, este patrón se correlaciona con la cobertura vegetal, el clima y las actividades productivas de la región, difiere entre CSC y NO CSC?

Como dominio o unidad espacial de estudio se trabajó a nivel de municipios, sus condiciones de humedad de suelo y de cobertura vegetal para cada uno de estos. Se trabajó con dos variables principales: humedad superficial del suelo y cobertura vegetal del suelo, para complementar el análisis se integraron 4 variables más: precipitación, temperatura en superficie, productividad agrícola y frecuencia de sequías.

1.3.2 Objetivos

General:

Analizar los patrones de distribución espacial de la humedad superficial del suelo en América Central y su relación con tres tipos de cobertura (bosque, pastos, cultivos), aplicando técnicas geoestadísticas en dos contextos regionales: dentro del CSC y fuera de éste.

Específicos:

- Procesar los datos de humedad de suelo, cobertura, precipitación y temperatura por sub-regiones y municipios.
- Identificar correlaciones entre la humedad del suelo y tres tipos de cobertura (bosque, pastos, cultivos) por municipio, diferencias entre regiones (CSC y NO CSC), y patrones de agrupamiento espacial.
- Contrastar la distribución espacial de la humedad de suelo con las características climáticas, zonas afectadas por sequías y las zonas agroproductivas de América Central.

1.4 DELIMITACIONES

1.4.1 Zona de estudio

El área de estudio comprende América Central, que integra la ecorregión del CSC (delimitación con base en el Índice de Riesgo Climático (CIAT - Banco Mundial - PNUD, 1999)) y áreas fuera del CSC (figura 1). Se consideraron dos unidades espaciales para analizar, la primera son divisiones administrativas correspondientes a municipios (n = 1197) y la segunda es la unidad espacial determinada por los datos, que corresponde a celdas 1 km x 1 km.

Las divisiones administrativas conocidas como municipios, cantones (Costa Rica) o distritos (Panamá) son áreas administradas por gobiernos locales (alcaldías o municipalidades) las cuales gestionan y regulan el uso de las tierras, los recursos naturales, el desarrollo socioeconómico, planifican y ejecutan el ordenamiento del espacio y atienden las necesidades de sus pobladores, también deben identificar la situación del municipio en materia de riesgo y vulnerabilidad ante eventos naturales o antrópicos.

Belice no se incluye en esta investigación dado la condición de su división administrativa, las cuales son de primer orden (departamentos o provincias) y carece de una menor segregación de gobierno local establecido, además su territorio está en su totalidad fuera de la delimitación del CSC por lo cual no se puede hacer una diferencia explícita entre área fuera y dentro de este territorio.



Figura 1. Área de estudio, América Central y Corredor Seco Centroamericano.

1.5 ALCANCES DEL PROYECTO

Este proyecto pretende realizar un análisis de contexto regional, utilizando la humedad de suelo como variable integradora entre el contexto climático, la cobertura vegetal y la productividad agrícola, para determinar zonas vulnerables a eventos secos; para ello se contó con una recopilación de productos de acceso libre provenientes de sensores remotos, de agencias científicas internacionales como la NASA, productos realizados por organismos internacionales como la FAO e investigaciones locales sobre sequía.

También se buscó una integración entre el componente SIG (software: QGIS 3) y el lenguaje de programación R para obtener sistematización de procesos y representaciones gráficas de alta calidad, siendo así una investigación realizada con software de licencia libre y datos proveniente de repositorios de acceso libre.

1.6 LIMITACIONES

Entre las limitaciones más relevantes se encuentra la disponibilidad de datos de humedad de suelo, los cuales hasta la última década han sido explorados a través de su obtención por medio de sensores remotos; lo cual restringe su resolución temporal a un rango de entre 5 a 10 años de información, por otro lado aunque los datos en la actualidad son sistematizados para generar productos diarios su resolución espacial es limitada, la cual varía entre 10 y 30 km por celda, lo que hace necesario la aplicación de modelos de interpolación, modelado y reducción de escala por medio de observaciones más detalladas en superficie como las coberturas vegetales.

Datos de validación en campo de humedad de suelo de acceso libre son considerablemente escasos para América Central, según el visualizador de humedad del suelo del [Laboratorio Nacional Oak Ridge \(ORNL - DAAC\)](#) de la NASA (2017), los únicos datos de acceso libre se encuentran en la Estación Biológica La Selva (Sarapiquí, Costa Rica), la cual posee datos del sensor AirMOSS (microondas), datos de la estación FLUXNET (red de sensores meteorológicos global) y datos del sensor utilizado en esta investigación SMAP – NASA. Este

visor hace una representación gráfica de cada repositorio de datos. Dada esta condición de escasa disponibilidad de datos no se puede obtener una validación de los mismos para toda la región.

La dinámica de cobertura de la tierra no se obtiene de manera mensual contrario a las variables de humedad de suelo, precipitación y temperatura, esto debido a las pocas variaciones de la misma en cortos periodos, por lo cual el análisis se realiza con el promedio para el periodo de 1998 – 2012 (GLC-SHARE, 2014). Por lo cual no necesariamente las variables de cobertura y humedad del suelo poseen una correspondencia temporal en esta investigación. En esta decisión se decidió utilizar los datos de cobertura más recientes y cercanos posibles al periodo 2015 – 2019 del cual es que se posee humedad del suelo del sensor SMAP.

Los análisis estadísticos se realizan bajo una condición de parametricidad, además se realizan en un ámbito espacial definido por cada municipio como unidad, en donde cada variable tiene un valor determinado según el promedio de toda la extensión del municipio, por lo cual los resultados se interpretaron en esa línea.

CAPITULO 2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Cobertura del suelo y sensores remotos

En las últimas décadas el avance del monitoreo de cobertura del suelo a partir de sensores remotos ha experimentado un crecimiento vertiginoso al punto de disponer de una gran variedad de productos publicados en la actualidad, según [Pérez-Hoyos et al. \(2017\)](#) entre los más importantes y más utilizados se encuentran: FAO-GLCshare, Geowiki Hybrid 1-IIASA, GLC2000-JRC, GLCNMO v2-ISCGM, GlobeLand30, GlobCover 2009-ESA, LC-CCI 2010-ESA, LC-CCI 2015 y MODISLC 2010-NASA. Estos productos poseen diferencias sustanciales de temporalidad, resolución espacial y metodología de clasificación por lo cual es necesario tener bien definido el enfoque de investigación para seleccionar alguno de ellos.

Los mismos autores concluyen que entre los mejores productos de acceso libre para el monitoreo de tierras cultivadas se encuentra el [FAO-GLCshare \(2014\)](#) usado en esta investigación, ya que integra productos de escala global con información recopilada localmente además poseen una cobertura global del 80% aproximadamente y su congruencia es alta con bases de datos de campo como la de estadísticas agrícolas por país de la FAO.

Las actividades humanas reflejadas en la superficie son uno de los principales retos de monitorear a largo plazo, principalmente por problemáticas como la que afronta la seguridad alimentaria en países en desarrollo. La cobertura del suelo en cierto modo representa los recursos naturales que puede disponer o conservar la especie humana para su desarrollo. A futuro, el enfoque de la producción de datos de cobertura debe seguir la línea de estandarizar las clasificaciones de cobertura y realizar esfuerzos por reducir la escala para campos de análisis, dada la capacidad que da ahora los procesamientos en la nube y la disposición de forma gratuita de imágenes satelitales de resolución por debajo de los 50 metros por celda ([Pérez-Hoyos et al., 2017](#)).

2.2 Relación humedad suelo y cobertura vegetal

Las relaciones entre cobertura y las propiedades físicas y químicas del suelo han sido notablemente estudiadas en el campo de la agronomía, muchos de estos estudios se han realizado a escalas muy focalizadas (por fincas o parcelas), en condiciones controladas o no. En el estudio de [Sánchez-Saenz *et al.* \(2010\)](#) sobre el efecto de la cobertura en las propiedad del suelo para la producción de frijol irrigado, se llevan a cabo una serie de pruebas comparativas de las condiciones de producción del frijol, en las cuales la humedad del suelo es uno de los aspectos que influyen en ésta. Entre sus resultados más relevantes con la temática de esta investigación encontraron que a mayor cantidad de cobertura vegetal, mayor es la cantidad de agua contenida en el suelo.

Paralelamente en el estudio desarrollado por [Martinez-Gonzalez *et al.* \(2010\)](#) en la cuenca La Esperanza ubicada en el municipio de Guanajuato, México, se evaluó cómo cambia el comportamiento de la humedad de suelo con respecto a diferentes tipos de cobertura, en este caso se utilizaron coberturas vegetales de distintos estratos: encinos, arbustos de jarilla y uña de gato, eucaliptos y sin vegetación. Los resultados indican que el tipo de vegetación influye directamente con la cantidad de agua almacenada en el suelo tanto para periodos secos y lluviosos, la vegetación de mayor desarrollo vertical retiene más la humedad en el suelo: los eucaliptos en periodos secos y los encinos en periodos lluviosos. Además las zonas de mayor pérdida de humedad en periodos secos corresponden a las zonas sin vegetación.

Es necesario mencionar brevemente que la textura del suelo también influye en los procesos de retención de humedad, [Largaespada & Enríquez \(2015\)](#) confirmaron una alta correlación entre contenido de arcilla y humedad del suelo, en comparación con los limos y las arenas, es de conocimiento que esta capacidad es debido al tamaño de las partículas y su estructura en determinado tipo de suelo.

2.3 Relación humedad suelo y precipitación

La retroalimentación entre precipitación y humedad del suelo es un fenómeno conocido y estudiado por diversas disciplinas desde hace varias décadas, ya que cumple un papel importante en los intercambios de energía, el ciclo hidrológico, así como la distribución espacial y temporal de ambas variables. Entre la variedad de estudios realizados se encuentran los siguientes:

En la tesis de maestría de [Kirsten L. Findell \(1997\)](#) desarrolla un estudio sobre las relaciones entre humedad del suelo y precipitación por medio de observaciones directas en el estado de Illinois, Estados Unidos. Entre las primeras conclusiones del tercer capítulo llamado *The Relationships Between Soil Saturation and Subsequent Rainfall* se comprueba la hipótesis de que la saturación de los suelos están positivamente correlacionadas con las precipitaciones posteriores con significancia ($r^2 > 0.4$) en la estación de verano. Por su parte [Bonilla et al. \(2002\)](#) establecen que las variaciones en el contenido de humedad del suelo están determinadas principalmente por la distribución estacional de las precipitaciones. Se observó también una participación importante de la evapotranspiración en primavera y verano lo que en determinadas especies resulta en una demanda más alta de agua, por lo que los niveles de humedad de suelo en estas condiciones pueden disminuir ligeramente.

Más recientemente [Yang et al. \(2018\)](#) estudiaron los patrones a nivel global de las retroalimentaciones entre humedad de suelo y temperatura (SM-P) a partir de datos obtenidos de sensores remotos satelitales y conjuntos de datos de observación de la Tierra. Estos autores encontraron como en los estudios anteriores que la retroalimentación positiva (correlación positiva) entre SM-P se da en un 87.09% a escala global, sin embargo también se encuentra un porcentaje no despreciable de retroalimentación negativa (correlación negativa) 12.91%. Estas últimas correlaciones negativas se presentaron en condiciones extremadamente húmedas o secas, y se atribuyen a cambios en la evapotranspiración y su relación con la humedad de suelo.

2.4 Relación humedad suelo y temperatura de la superficie

Los siguientes autores desarrollaron estudios entre estas dos variables, con resultados significativos: en primer lugar la investigación desarrollada por [Lakshmi et al. \(2003\)](#) en donde realizaron mediciones en campo en Oklahoma y Georgia (Estados Unidos) durante los años 1999 y 2000 se concluye que a través del tiempo la humedad del suelo y la temperatura superficial responden a un patrón inverso (relación negativa) lineal, esta tendencia también se valida en las estimaciones de humedad de suelo realizadas a partir de temperatura de la superficie, ya que sus resultados fueron congruentes.

[Jin & Mullens \(2014\)](#) relacionaron 4 variables: humedad y temperatura del suelo, temperatura de la superficie y temperatura del aire (2 m), utilizando datos de observación del suelo ARM (Atmospheric Radiation Measurement) y estimaciones del modelo CML4 (Offline Community Land Model). Las conclusiones con respecto a temperatura de superficie y humedad del suelo se resumen en una relación negativa en donde: *“más humedad del suelo conduce a una mayor energía radiactiva absorbida, redistribuida en flujo de calor latente en lugar de flujo de calor sensible”* ([Jin & Mullens, 2014](#)); además indican que esta relación es estrechamente controlada por los eventos de precipitación.

2.5 Humedad de suelo y agricultura

El déficit hídrico para la producción agrícola es uno de los escenarios a combatir en la agricultura actual, ya que es el factor de estrés más significativo que limita el desarrollo de los cultivos ([Lobell & Field, 2007](#); [Reza et al., 2010](#); citados por [Estrada et al., 2015](#)) por lo cual la capacidad de retención de agua en el suelo es una variable de importancia espacial y temporal para la producción agrícola. Según [Benites & Castellanos \(2003\)](#) una mayor cantidad de agua en el suelo pueden tener resultados muy favorables para la producción agrícola entre ellos los siguientes:

- Rendimientos más altos (acompañado de los nutrientes necesarios).
- Reducción del riesgo de pérdidas debido a la sequía.
- Recarga del agua subterránea, asegurando el nivel del agua en los manantiales y la continuidad de los flujos de ríos y cursos de agua.

Un ejemplo de la importancia de la humedad de suelo fue expuesto por [Estrada et al.](#) en el año [2015](#) en donde evaluaron el desarrollo de bulbos de cebolla con respecto a varios porcentajes de humedad en el suelo, utilizando 5 variedades de cebolla. En sus resultados evaluaron el peso promedio, el diámetro ecuatorial y polar de cada bulbo con resultados significativos en donde un déficit de humedad de suelo incide directamente en la disminución del peso y el tamaño de los mismos.

2.6 Humedad de suelo en geografía

Uno de los aportes más significativos a la literatura con respecto al abordaje de la variable humedad del suelo por la disciplina de la geografía, es la investigación de [Legates et al. \(2010\)](#) en la cual se analiza el poder integrador de la humedad del suelo entre las variadas ramas de la geografía física, tales como la geomorfología, la hidrología, el clima y la biogeografía.

La necesidad para obtener y recopilar mediciones de humedad suelo cada vez más finas pueden fortalecer las investigaciones en esta línea, ya que para el autor es importante abordar la humedad del suelo desde la geografía física según sus siguientes conclusiones puntuales:

- Proporcionar un mejor entendimiento de las interacciones tierra – atmósfera.
- Desarrollo de pronósticos climáticos estacionales y decenales.
- Calibración, validación y mejores rendimientos de parametrizaciones para modelos globales, regionales y locales de la superficie terrestre.

- Desarrollo y validación de algoritmos para la estimación de humedad de suelo a partir de sensores remotos satelitales.
- Monitoreo del cambio climático y su variabilidad.

El autor también complementa con una serie de interrogantes relacionados a la heterogeneidad temporal y espacial de la humedad del suelo, argumenta que las interrelaciones entre coberturas como bosques y agrícolas, clima y suelo con los patrones espaciales de la humedad de suelo aún no están muy claras, interrogante que de ser desarrollado y aclarado permitiría un avance en estimaciones más precisas de la cantidad de agua requerida en los procesos de evapotranspiración y en consecuencia optimizar los rendimientos de los cultivos aplicados en agricultura de precisión.

2.7 Corredor Seco Centroamericano

Varios autores han tomado como base el estudio del CSC, tanto desde una perspectiva climática (Hidalgo *et al.*, 2015; 2019, Quesada-Hernández *et al.*, 2019), social (Gotlieb *et al.*, 2019), ecosistémica (Van der Zee *et al.*, 2012) e impactos de sequía (Calvo-Solano *et al.*, 2018), así como reportes de la FAO en temas de seguridad alimentaria, productividad agrícola y eventos extremadamente secos en esta región. El CSC se define como:

*“Grupo de ecosistemas localizados en la ecorregión del bosque tropical seco de Centroamérica. Dicha ecorregión inicia en Chiapas, México y sigue una franja por sobre las zonas bajas de la vertiente del Pacífico y la región central premontana de Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y parte de Costa Rica (hasta Guanacaste). En Honduras, el CSC se extiende a través del centro y occidente del país, hasta aproximarse a la costa caribeña.” (Van der Zee *et al.*, 2012)*

Como lo indica [Hidalgo et al. \(2019\)](#) la delimitación geográfica exacta del corredor es imprecisa, por lo que puede variar en diferentes estudios. La delimitación más adoptada es la que realiza el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Banco Mundial y Programa Ambiental de las Naciones Unidas (PNUMA) para el año 1999 en la cual se integra por áreas que poseen una estación seca definida con mínimo cuatro meses de duración ([Gotlieb et al., 2019](#)), esta delimitación es la que se adopta para esta investigación.

2.8 Sequía

El concepto de sequía es amplio desde una perspectiva teórica, dado su complejidad el mismo se ha dividido en 4 conceptos más definidos, que según el [Ministerio para la Transición Ecológica del Gobierno de España \(s.f.\)](#) corresponden a:

- Sequía meteorológica: se presenta cuando ocurre una disminución pronunciada y continuada de las precipitaciones, es la de mayor importancia ya que da origen a los otros tres tipos de sequía. Es originada principalmente por las interacciones océano - atmosfera en regiones específicas, por lo general abarcan una gran extensión espacial y puede desatar fenómenos paralelos como temperaturas más altas, mayor intensidad de vientos, reducida humedad relativa, aumento de evapotranspiración, menor presencia de nubes y mayor insolación.
- Sequía hidrológica: relacionada directamente con la escasez o ausencia de caudal en la red hídrica, la disminución del nivel de cuerpos de agua superficiales naturales o artificiales y aguas subterráneas. Este tipo de sequía se puede presentar meses, años después de una sequía meteorológica, o en casos de retornar las precipitaciones rápidamente puede no presentar este fenómeno.

- Sequía agrícola e hidroedáfica: este tipo de sequía está muy relacionada con la humedad del suelo, ya que esta se presenta en la zona radicular de donde la vegetación extrae los componentes para su desarrollo. Este tipo de sequía depende de varios factores entre ellos el tipo de cultivo y la época, además en zonas de riego la sequía agrícola dependerá del tipo de suelo y la presencia o no de sequía hidrológica.
- Sequía socioeconómica: se trata de los efectos de la faltante de agua para el consumo humano y para las actividades económicas, las pérdidas económicas relacionadas con la falta del recurso hídrico en la actualidad son más comunes, debido al crecimiento poblacional y la demanda creciente de agua.

Como se puede observar la sequía se puede abordar desde diferentes puntos de vista y disciplinas, esto lo hace un concepto de interés multidisciplinario, dada su complejidad y sus repercusiones sociales y naturales. Muchas veces el no poseer una definición precisa y objetiva de sequía crea dificultades para formular y llevar a cabo políticas para su prevención y adaptación, también los efectos indirectos se extienden más allá de los límites espaciales definidos de la sequía (Wilhite & Glantz, 1985).

2.9 Clima en América Central

El régimen climático de América Central y proyecciones a largo plazo son estudiados a profundidad por Karmalkar *et al.* (2011) en su artículo *Climate change in Central America and Mexico: regional climate model validation and climate change projections* desarrolla una caracterización muy completa del clima de la región y los fenómenos que la generan. Atribuye el clima de la región a tres fenómenos clave:

- Caribbean low-level jet (Jet de Bajo Nivel del Caribe): Corresponde a vientos provenientes del este observados en la troposfera baja, los cuales poseen una máxima de viento zonal aproximadamente en 925 hPa (Amador, 1998; 2008, Poveda & Mesa, 1999, Wang, 2007, Hidalgo *et al.*, 2019), los cuales aportan la principal fuente de humedad para América Central (Duran-Quesada *et al.*, 2010).
- Formación de nubes orográficas (Orographic cloud formation): Este fenómeno es muy importante para distribuir humedad en periodos secos, los vientos alisios son elevados por las laderas de barlovento y las altas elevaciones de las laderas sotavento en los ejes montañosos de la región, ocasionando un fenómeno llamado “precipitación horizontal” lo cual representa un aporte significativo en la precipitación total de la estación seca (Bruijnzeel & Proctor, 1993; Clark *et al.*, 1999).
- El Niño Oscilación del Sur (ENOS): Al estar rodeado de dos grandes masas de agua la variación interanual del clima en América Central estará determinado por la variabilidad climática de los océanos. El fenómeno ENOS establece la temperatura superficial del mar dominante y la dinámica atmosférica del Pacífico, por lo cual también es el principal componente modificador de la variabilidad climática en América Central (Giannini *et al.*, 2000 – 2001; Waylen *et al.*, 1996).

También define seis zonas climáticas a partir de similitudes en patrones de precipitación y temperatura, las cuales distinguen áreas entre frías-secas y cálidas-húmedas, separando también estas zonas por localización según laderas barlovento y sotavento, debido a la importancia de la topografía en definir los patrones climáticos de la región.

2.10 Humedad de suelo y sensores remotos

Los esfuerzos por medir la humedad de suelo en grandes continuidades espaciales y temporales a partir de tecnología de observación remota de la Tierra son revisadas por Petropoulos *et al.* (2015) en una exhaustiva investigación que abarca las principales técnicas de recolección de información terrestre y los principales productos generados a nivel global. Remontándose a 20 años atrás logra desarrollar el estado actual de las mediciones de

humedad de suelo y los retos futuros para la comunidad científica de observación de la Tierra. Para los autores existen tres métodos de detección de humedad de suelo en la superficie:

- Por medio de la detección óptica: los cuales se dividen en métodos basados en la reflectancia y los métodos basados en infrarrojos térmicos; poseen una buena resolución espacial, variedad de satélites a disposición y una tecnología desarrollada pero poseen limitantes según la cobertura vegetal e interferencias atmosféricas.
- Por medio de métodos de detección por microondas: estos se dividen en detección pasiva o activa; los cuales evitan las interacciones con la atmosfera y nubes, se puede coleccionar información en día y noche, pero su resolución espacial es considerablemente gruesa en especial el método pasivo, además se puede ver influenciado por la rugosidad del terreno.
- Por medio de métodos sinérgicos: existen tres formas de realizar estos métodos, detección óptica con observaciones infrarrojas térmicas, fusión de datos de microondas activos y pasivos, fusión de datos infrarrojo óptico/térmico y microondas; estos tipos de fusiones han dado resultados prometedores pero su desarrollo tecnológico es incipiente por lo que aún no se puede explotar a grandes rasgos.

También los autores hacen una descripción de los principales productos de humedad de suelo disponibles en la actualidad, valoran sus ventajas y desventajas a la hora de ser validados y procesados, los productos valorados son los siguientes: The Advanced Scatterometer (ASCAT, 2007), Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS, 2010), Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR-2, 2013) y Soil Moisture Active Passive (SMAP, 2015), este último utilizado en esta investigación.

Concluyen que a pesar de todos los avances en las últimas décadas de detección de la humedad del suelo por medio de sensores remotos aún está en un subdesarrollo, debido que todavía se requiere dar solución a muchas limitantes a la hora de la recolección de datos por medio de satélites (interacciones con cobertura y atmosfera, resolución espacial y temporal, modelos de estimación), también una estandarización de variables con las cuales se pueda estimar de manera eficiente la humedad del suelo. El desarrollo de métodos sinérgicos parecen ser una buena vía de desarrollo, entre esa línea los datos de SMAP que combinan frecuencias de sensores activos y pasivos producen los datos de humedad de suelo más prometedores de la actualidad, aunque las misiones Sentinel de la ESA pretenden mejorar el enfoque sinérgico combinando una serie de métodos de detección sistematizados a futuro.

2.11 Indicadores locales de asociación espacial

En la última década del siglo XX se desarrollaron los Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA, siglas en inglés) por parte del economista [Luc Anselin \(1995\)](#), a partir de la descomposición de los indicadores globales como el coeficiente I de Moran (1950) que considera la primera ley de la geografía desarrollada por [Tobler \(1979\)](#):

“en el análisis geográfico todo está relacionado con todo, pero las cosas cercanas están más relacionadas entre sí que las cosas lejanas” (Tobler, 1979).

Con el objetivo de estimar el aporte de cada observación local al comportamiento global y poder determinar valores atípicos considerando el espacio, ante eso también se estableció que los LISA podían establecer la zonas o “puntos calientes” estadísticamente significativos del comportamiento de determinada variable en el espacio ([Anselin, 1995](#)).

La definición teórica, metodológica y aplicada de LISA se puede resumir respectivamente como:

“la colección de técnicas que lidian con las peculiaridades causadas por el espacio en el análisis estadístico de los modelos de la ciencia regional” (Anselin, 1995).

“evalúa localmente: para cada punto con valor conocido, se evalúa el grado de concordancia o discordancia con los valores más cercanos. Decimos que la I de Moran asume homogeneidad en los datos en tanto que el indicador LISA permite identificar zonas heterogéneas” (Arias & Sanchez, 2014).

“es la concentración o dispersión de los valores de una variable en un mapa. Dicho de otra manera, la AE refleja el grado en que objetos o actividades en una unidad geográfica son similares a otros objetos o actividades en unidades geográficas próximas” (Goodchild, 1987).

Existen una serie de tipos de indicadores LISA, entre ellos son conocidos los coeficientes C de Geary Local, Gamma Local e I de Moran Local, para esta investigación se utilizó este último dado su amplio uso en análisis espacial, dado que I de Moran es en esencia un coeficiente de correlación de Pearson ponderado por una matriz de pesos espaciales definidas por el usuario, cuyo rango es de -1 a 1 (Goodchild, 2008). La ecuación respectiva al indicador local de Moran I se define como (Celemin, 2009):

$$I_i = (Z_i/m_2) \sum_{j=1}^n W_{ij}Z_j$$

Donde las observaciones Z son las desviaciones de la media ($x_i - \bar{x}$), m_2 es la varianza y W_{ij} es la matriz de pesos definida por el usuario, en la cual se asigna un valor de 1 a los vecinos de cada observación y 0 a las demás observaciones, es importante considerar que esta ecuación se ajusta al valor global de Moran sumando las unidades locales espaciales.

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El enfoque metodológico se basó en un enfoque empírico-analítico ya que se compone de análisis estadístico cuantitativo, experimentación y observación de fenómenos (Radrián, 2005). Se adopta este enfoque debido a la aplicación que se le puede dar a los datos obtenidos de sensores remotos, los cuales en la actualidad son de gran uso en centros de investigación científica a nivel global, en América Latina el uso de estas herramientas de teledetección está en desarrollo, dado que la mayoría de productos están pensados y calibrados para altas latitudes, por lo cual la experimentación con variables como humedad de suelo, cobertura obtenidos de este tipo de datos para la región de América Central representa un reto y una iniciativa para hacer más uso de estos productos globales.

3.2 INSTRUMENTOS

Se trabajó con datos de tipo secundario los cuales son productos derivados de sensores remotos como se mencionó anteriormente y otros derivados de investigaciones locales sobre cambio climático. Las variables a considerar son: humedad de suelo, cobertura vegetal de suelo, precipitación, temperatura en superficie y frecuencia de sequías. Los análisis y procesamientos tanto espaciales como estadísticos realizados se llevaron a cabo utilizando paquetes informáticos de código abierto o software libre, entre los cuales se encuentran: **R** (3.6.0) – **RStudio** (1.2.1335), **QGIS** (3.6.3) y **GeoDa** (1.12).

Los criterios de definición para la selección de los datos se establecieron considerando las siguientes cláusulas:

- Temporalidad: se consideran los datos generados más actuales posibles.
- Resolución espacial: al trabajar con una extensión espacial regional se define una resolución espacial de 1 kilómetro cuadrado por celda.
- Formato de origen: se establece el formato GeoTIFF a utilizar debido a su factibilidad en el uso dentro de los SIG, para los datos que no posean este formato se evalúa su potencialidad de conversión y poca pérdida de información.
- Formato de unidades de medida: para los análisis y procesos ejecutados se establece que las unidades de medida de los productos sean de tipo continuo.

Los datos seleccionados fueron procesados en tres fases correspondientes a cada objetivo específico; los conjuntos de datos utilizados se muestran en la [tabla 1](#):

Tabla 1. Repositorios de datos utilizados.

Nombre	Variable	Unidades de medida	Resolución espacial	Resolución temporal	Proyección	Formato nativo	Escala geográfica
SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 4	Humedad del suelo en la zona de raíz (100 cm)	Humedad volumétrica (m ³ /m ³)	9 km	3 horas (2015 – presente)	EPSG:6933 WGS 84 / NSIDC EASE- Grid 2.0 Global	HDF5	Global
Global Land Cover Share Database	Cobertura del suelo	Porcentaje de cobertura por pixel (%/pixel), 11 categorías	1 km	Promedio serie temporal (1998 – 2012)	EPSG:4326 World Geodetic System 1984	GeoTIFF	Global
WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas	Promedio precipitación y temperatura	mm, °C	1 km	Climatología mensual (1970 – 2000)	EPSG:4326 World Geodetic System 1984	GeoTIFF	Global
Global Spatially-Disaggregated Crop Production Statistics Data for 2010 Version 1.0	Actividades agroproductivas	Área física y cultivada (ha), producción (toneladas métricas), rendimiento (kg/ha)	10 km	2010	EPSG:4326 World Geodetic System 1984	GeoTIFF, CSV, DBF	Global
Percentage Drought Recurrence - Dynamical delimitation of the Central American Dry Corridor (CADC) using drought indices and aridity values	Porcentaje de frecuencia de sequías	Porcentaje de recurrencia espacial	~ 1 km	1970 – 1999	EPSG:4326 World Geodetic System 1984	Esri grid	América Central

3.3 PROCEDIMIENTOS

3.3.1 Objetivo 1. Procesar los datos de humedad de suelo, cobertura, precipitación y temperatura por sub-regiones y municipios

Descripción de los datos

SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture:

La estimación realizada por SMAP/NASA de la humedad en la zona de raíz (root zone) que abarca los primeros 100 cm de suelo. La precisión del producto SMAP es de **0.04 m³**, con respecto a las validaciones tomadas en campo por el equipo de la NASA.

Global Land Cover Share Database:

Se utilizan las tres coberturas de mayor presencia en la región (bosque, pastos y cultivos), según [Hernández et al. \(2011\)](#) estas tres coberturas cubren un 37.17%, 17.38% y 12.56% respectivamente de toda la superficie de América Central, para el set de datos las categorías correspondientes son:

- 02 – Cropland (tierras de cultivo)
- 03 – Grassland (tierras de pastos)
- 04 – Tree Covered Area (áreas de cobertura de árboles)

Las unidades es porcentaje de cobertura por pixel con lo cual se obtiene continuidad espacial por cobertura y se evita ese sesgo de cobertura dominante por pixel en unidades categóricas, que traen otros repositorios de datos.

WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas:

El repositorio WorldClim tiene a disposición una serie de datos estimados a partir de estaciones meteorológicas, modelado y procesos de interpolación a escala global, la serie de tiempo utilizada abarca los años 1970 – 1999, las variables utilizadas poseen los siguientes resultados de correlación entre las estimaciones y observaciones: temperatura

media = **0.996**, precipitación = **0.861**. Lo cual muestra robustez en el uso de estos datos, además que su descomposición mensual permite la comparación con los datos de humedad de suelo.

Global Spatially-Disaggregated Crop Production Statistics Data for 2010 Version 1.0

La productividad agrícola mundial representada en datos de cuadrícula para 42 tipos diferentes de cultivos y dos formas específicas de producción a partir del **Modelo de Asignación de Producción Espacial** (SPAM por sus siglas en inglés) genera productos de mayor precisión que datos a nivel nacional. Estos datos se generan a partir de una variedad amplia de insumos tanto de sensores remotos como reportes de producción, encuestas realizadas por ONGs a escala local y regional; en un enfoque de entropía cruzada. El equipo de producción de los datos se enfocó en los países en vías de desarrollo para poder identificar y localizar las principales actividades agro-productivas de los mismos de esta manera poder hacer frente a las crisis de seguridad alimentaria que se visualizan a futuro ([International Food Policy Research Institute, 2019](#)).

Preparación de los datos

Los procesos realizados en esta sección corresponden a tareas de preparación de los productos antes descritos para su posterior análisis en los objetivos siguientes ([figura 2](#)), el uso de archivos ráster globales de alta resolución espacial proporcionan continuidad espacial que permiten determinar promedios por unidades espaciales generalmente en formato vectorial, estas unidades pueden corresponder a diversas delimitaciones naturales, sociales o administrativas.

Para este caso se utilizan las divisiones político-administrativas de nivel 2 (municipios) **Global Administrative Boundaries (GADM)** obtenidas a partir del [Centro de Ciencias Geoespaciales de la Universidad de California \(2018\)](#), se escogió este compendio de datos vectoriales dado la falta de la disponibilidad de estos en formato vectorial por parte de algunas instituciones encargadas de la información geográfica de cada país; cabe resaltar

que algunos países si poseen la información a disposición pero para estandarizar el tipo de unidad geográfica de todos los países se decidió utilizar el repositorio GADM.

Descargas:

La descarga de los datos ser realizó por medio del navegador del ordenador en el caso de cobertura, precipitación, temperatura y producción agrícola, los mismos se encuentran disponibles en repositorios de acceso libre, en el caso de los datos de humedad de suelo existen varias opciones para su descarga, entre ellas la más óptima para la obtención de los datos es por medio del paquete “*smapr*” (0.2.1) para el lenguaje de programación R ([anexo 1](#)) el cual permite obtener la variables contenidas en el archivo de formato HDF-5 definiendo el rango de tiempo, el tipo de producto, y la opción de convertir en formato GeoTIFF, adecuado para su procesamiento en SIG. La resolución temporal de los datos de humedad de suelo corresponde a cada 3 horas, en el proceso de descarga se definió un rango de 15 días para descarga esto debido a una limitante computacional para procesar datos de más días.

Recortes y conversiones de formato:

A partir de estas delimitaciones de nivel 0 (países GADM) se realizó un contorno de formato vectorial con el cual se realizaron los correspondientes recortes de los ráster (precipitación, temperatura y cobertura) pasando de una extensión global a la extensión de la región de América Central esto por medio de SIG, en el caso específico de los datos de humedad de suelo SMAP el proceso de recorte se realizó utilizando el mismo código de descarga mencionado anteriormente ([anexo 1](#)) esto debido al formato de origen HDF-5.

Promedios mensuales y estacionales SMAP:

De los datos descargados de SMAP se obtuvieron archivos GeoTIFF promedio de 15 días, los cuales fue necesario procesar para obtener promedios mensuales ([anexo 2](#)). Los promedios estacionales ([anexo 3](#)) se realizaron con base en las estaciones climáticas del hemisferio norte para estandarizar periodos de tiempo de la siguiente manera:

- Diciembre, enero y febrero (DEF).
- Marzo, abril y mayo (MAM).
- Junio, julio y agosto (JJA).
- Septiembre, octubre y noviembre (SON).

Ambos procedimientos se llevaron a cabo desde R por medio del paquete **“raster”** (3.0.2) el cual provee una serie de funciones para el procesamiento de datos de grilla entre ellos los de formato GeoTIFF.

Reducción de escala y reproyección SMAP:

Se aplicó una reducción de escala a los datos promediados de humedad de suelo, este proceso se llevó a cabo utilizando la función **resample** del paquete **“raster”**, utilizando el método bilinear ajustado a 1 kilómetro de resolución espacial, este proceso es necesario para equiparar las resoluciones espaciales de la humedad de suelo con los datos de cobertura, precipitación y temperatura, a su vez se reproyectaron de WGS 84 / NSIDC EASE-Grid 2.0 Global (EPSG:6933) un sistema métrico, a World Geodetic System 1984 WGS84 (EPSG:4326) sistema geográfico, por medio de la función **projectRaster**, para tener todas las variables en un sistema de proyección común ([anexo 3](#)).

Promedios de variables por municipio y región:

Para realizar la correlación de variables por municipio se requirió extraer los valores promedio dado su extensión espacial (municipios), esta tarea se realizó por mes, para cada variable por medio de SIG utilizando la herramienta **estadística de zona** (*zonal statistics*) la cual genera una serie de estadísticas básicas considerando los valores de celda para una delimitación vectorial.

Definición de municipios según región y zonas urbanas:

Para realizar comparaciones entre regiones fue necesario determinar los municipios contenidos dentro de la región CSC y los que no (NO CSC) para lo cual se realizó un cálculo

de áreas según área dentro y fuera del CSC para cada municipio en SIG; el porcentaje establecido y el cual se ajustó mejor a la delimitación del CSC se fijó en mayor o igual a **35% de área dentro del CSC** para los municipios dentro de CSC, los menores a ese porcentaje se catalogaron como fuera de CSC. En el caso de los municipios donde su superficie representa un área urbana considerable, la estimación de correlaciones entre humedad y las demás variables no son representativas, al igual que las comparaciones entre regiones, por lo cual se excluyeron. Se utilizó la categoría **01 – Artificial Surfaces** del mismo set de datos de cobertura (GLC-SHARE, 2014) para determinar estos municipios los cuales si en promedio poseen mayor o igual a un 15% de área urbana no se tomaron en cuenta (anexo 4).

Conversión de formato ráster a vectorial:

Las variables de humedad del suelo estacional (DEF, MAM, JJA, SON) y cobertura (bosques, pastos y cultivos) se convirtieron en celdas de formato vectorial, utilizando R específicamente la función *rasterToPolygons* del paquete “*raster*” (anexo 3) para aplicar LISA posteriormente.

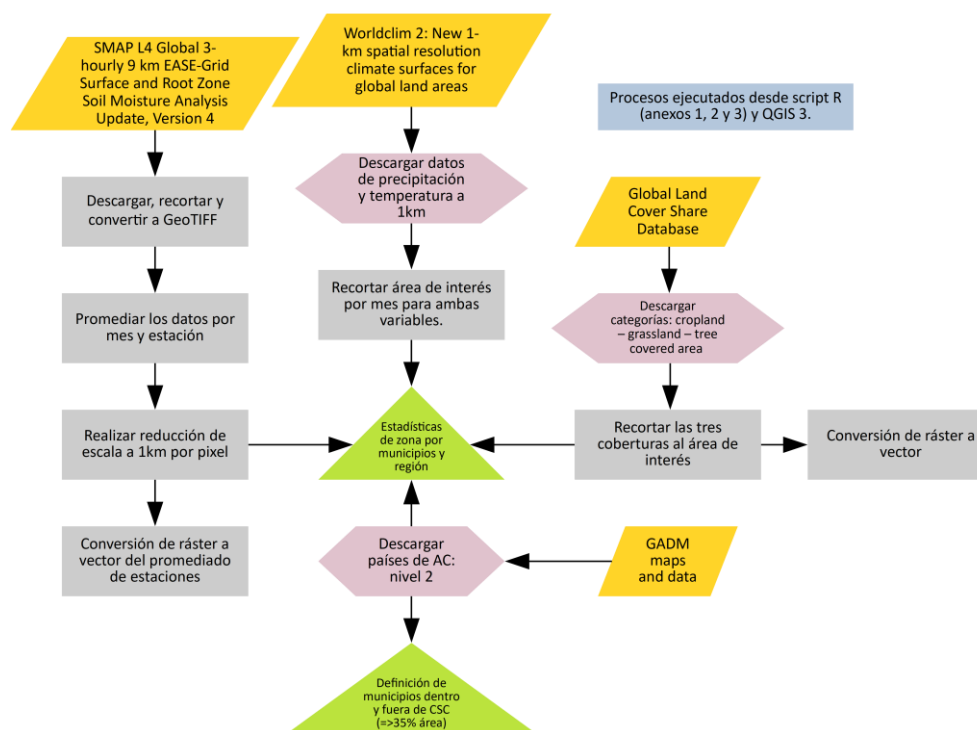


Figura 2. Diagrama de flujo con los procedimientos para el procesamiento de los datos establecido en el objetivo 1.

Es importante aclarar que en esta investigación no se utiliza una resolución espacial más fina, por ejemplo los productos [MODIS Land Cover Type \(2017\)](#) (500 metros) y [ESA Climate Change Initiative – Land Cover \(2015\)](#) (300 metros); ya que los procesos computacionales serían demandantes de mucho tiempo lo cual representaría una limitante importante, por esta razón se define trabajar a resolución superior a 1 kilómetro.

3.3.2 Objetivo 2. Identificar correlaciones entre la humedad del suelo y tres tipos de cobertura (bosque, pastos, cultivos) por municipio, diferencias entre regiones (CSC y NO CSC), y patrones de agrupamiento espacial

Patrones de distribución humedad suelo y cobertura:

Los productos vectoriales de humedad de suelo y cobertura en celdas de 1 km x 1 km, generados en los procedimientos del objetivo 1 se utilizaron para realizar el mapeo de estas variables en el área de estudio, para determinar patrones de distribución espacial estadísticamente significativos se realiza la prueba **I de Moran Local** ([Anselin, 1995](#)) la cual es llevada a cabo en el SIG geoestadístico GeoDa, para aplicar la autocorrelación espacial se determina una ponderación de pesos por contigüidad de tipo “Reina” ([figura 3](#)):

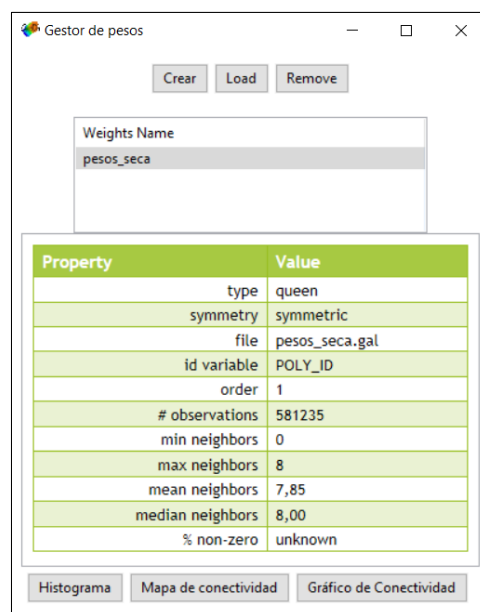


Figura 3. Ventana de gestor de pesos por contigüidad en GeoDa.

Esta ponderación de pesos determina la cantidad de vecinos de cada observación considerando todas sus contigüidades por pixel u observación, el tipo “Reina” toma las vecindades por vértices y segmentos por lo que cada pixel tendrán un conjunto de 8 vecinos, el cual se ejemplifica en la [figura 4](#):

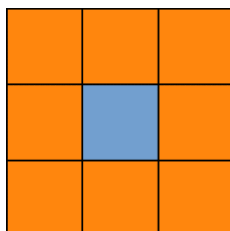


Figura 4. Vecinos establecidos (naranja) por contigüidad, para una observación espacial (azul).

La distribución espacial se determina según los valores de la observación y sus vecinos, los resultados de la prueba local de I de Moran se dividen en cuatro:

- Índice LISA
- Grupos de agrupamiento o clúster
- Significancia o valor p
- I de Moran Global

Estos valores se representan por observación o unidad espacial, menos el I de Moran Global; del conjunto de resultados el más importante es el de **grupos de agrupamiento o clúster**, ya que este define la categoría a la cual pertenece la observación, estas categorías GeoDa las codifica de la siguiente manera:

- **1** = agrupamiento de valores **alto – alto**
- **2** = agrupamiento de valores **bajo – bajo**
- **3** = agrupamiento de valores **bajo – alto**
- **4** = agrupamiento de valores **alto – bajo**

Los agrupamientos espaciales representados se establecen con una significancia de $p < 0,05$ y se representaron por medio de cartografía temática en SIG; los procesos realizados esquemáticamente se ilustran en la [figura 5](#).

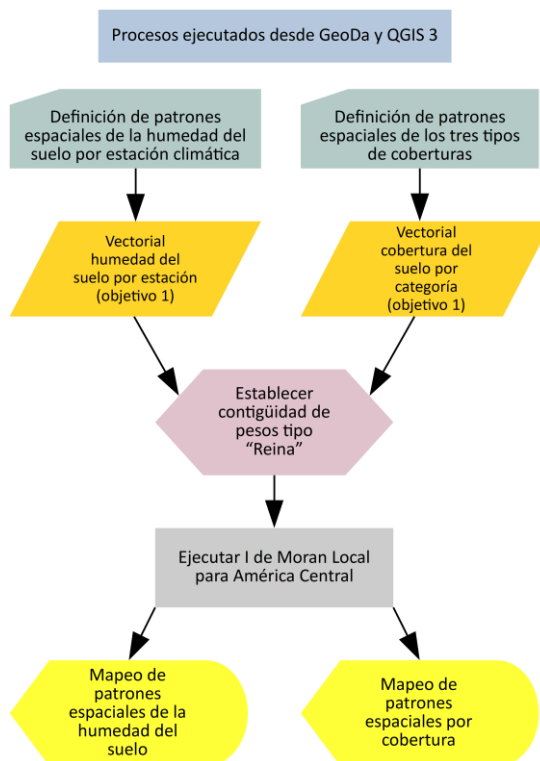


Figura 5. Diagrama de flujo del procedimiento para aplicar la autocorrelación espacial I de Moran Local.

Correlación espacial de la humedad del suelo y cobertura del suelo:

En la segunda sección del objetivo 2 se calcularon las correlaciones lineales entre humedad de suelo y los tres tipos de cobertura vegetal, a partir de los productos generados por municipios en el objetivo 1 se realizó la extracción del promedio para cada variable por municipio en un archivo de formato csv, en esta tabla se discrimina los municipios dentro de CSC y los NO CSC a partir de los municipios definidos por regiones en el objetivo 1.

Los procedimientos estadísticos llevados a cabo en esta sección se realizaron en R dado su potencial de análisis estadístico y su capacidad para la representación de resultados ([anexo 5](#)). El primer procedimiento es aplicar la función **cor** del paquete **"stats"** (3.6.2) el cual por defecto correlaciona todas las variables de tipo continuo almacenada en un dataframe,

utilizando el método de “Pearson” y para su representación gráfica se utiliza el paquete “**ggplot2**” (3.2.1). Las correlaciones se realizaron por mes para observar la variabilidad de la humedad en el tiempo, además al ser llevada a cabo con valores promedios para cada municipio se está considerando la variabilidad espacial de la humedad del suelo y de la presencia de cobertura.

En el segundo procedimiento se comparó las dos regiones de estudio CSC y NO CSC, por medio de las pruebas de hipótesis: **T de Student** (paramétrica) y **Wilcoxon-Mann-Whitney** (no paramétrica) con las funciones: “**t.test**” y “**wilcox.test**” respectivamente, ambas funciones del paquete “**stats**” base de R; se aplicaron para los valores promedios de humedad de suelo y cobertura por municipio diferenciado por región (anexo 5). Al igual que con las correlaciones se realizaron representaciones gráficas para validar los resultados de las pruebas estadísticas por medio de R y el paquete “**ggplot2**” (anexo 5). Descripción de las pruebas que se realizaron para ambas regiones:

- Prueba Shapiro-Wilk: prueba de hipótesis en la cual se demuestra la normalidad en la distribución de una muestra o población.
- Prueba Fligner-Killeen: prueba de hipótesis en la cual se demuestra la homogeneidad de la varianza entre dos muestras o poblaciones.
- Prueba T de Student: prueba paramétrica de hipótesis en la que se demuestra la diferencia de medias entre dos muestras o poblaciones.
- Prueba U Mann-Whitney: prueba no paramétrica de hipótesis en la que se demuestra la diferencia de medianas entre dos muestras o poblaciones.

En la [figura 6](#) se representa el flujo de procesos y entradas para el desarrollo de los procedimientos de la segunda parte del objetivo 2.

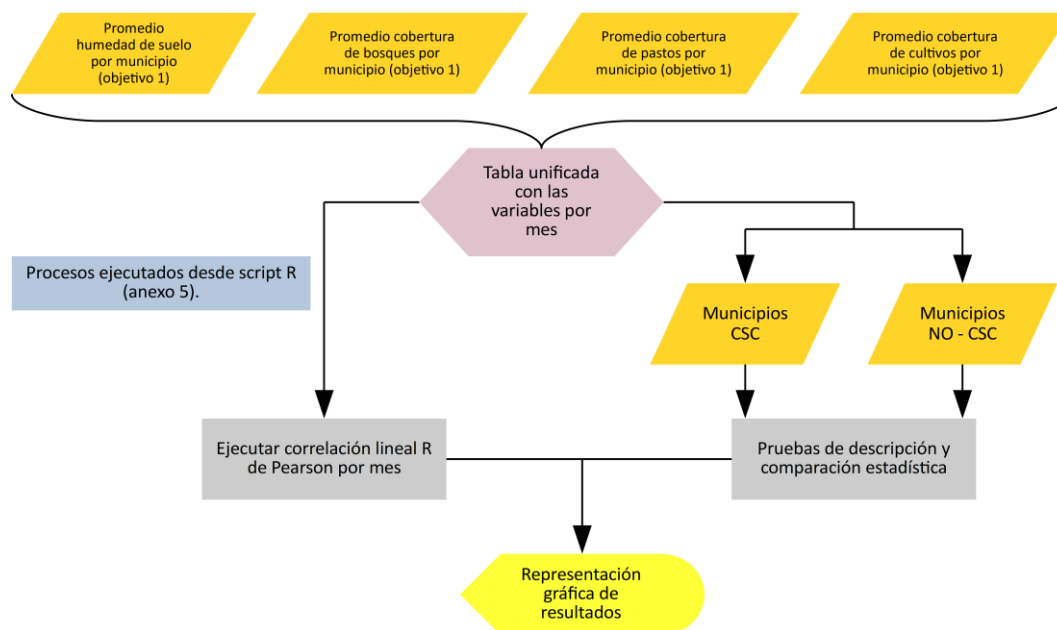


Figura 6. Diagrama de flujo de la serie de procedimientos para llevar a cabo la prueba de correlación entre humedad del suelo y cobertura, así como las pruebas de significancia estadística.

3.3.3 Objetivo 3. Contrastar la distribución espacial de la humedad de suelo con las características climáticas, zonas afectadas por sequías y las zonas agroproductivas de América Central

Correlación humedad de suelo con precipitación y temperatura de la superficie:

Se realizó una segunda prueba de correlación lineal entre los datos de humedad de suelo con datos derivados de climatologías promedio para la región de América Central, tanto precipitación y temperatura de la superficie, esto con el objetivo de comparar la distribución espacial de la humedad de suelo y las características climáticas del área de estudio e identificar tendencias.

Para realizar este apartado (figura 7) se cuenta con datos procesados en el objetivo 1 correspondientes al repositorio **WorldClim**, los valores promedios se extrajeron por municipio y se analizó cuales meses poseen más correspondencia entre estas variables. Los procedimientos son similares a los utilizados en las pruebas de correlación del objetivo 2;

en el [anexo 6](#) se muestra el código en R utilizado para el análisis de correlación de Pearson y su representación gráfica.

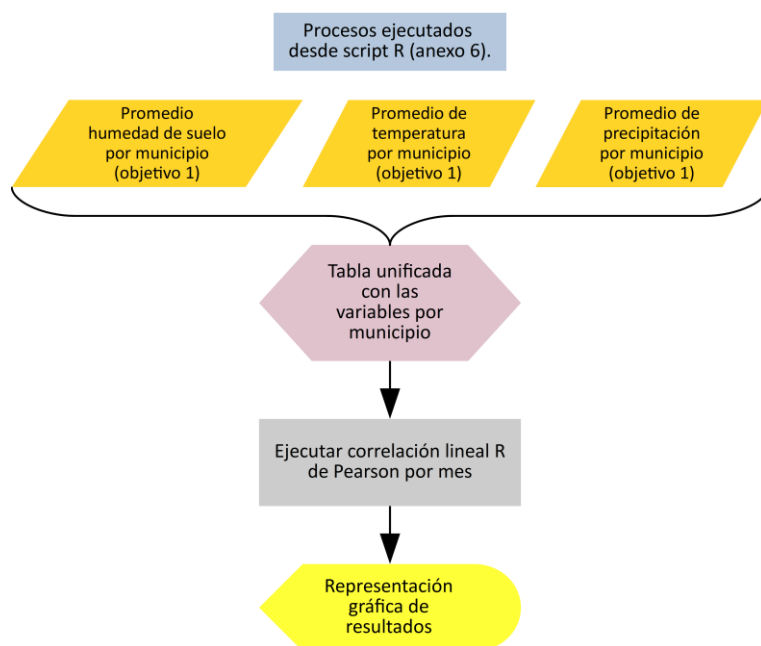


Figura 7. Diagrama de flujo con los procedimientos para correlacionar las variables de humedad de suelo, temperatura y precipitación.

Análisis espacial de la frecuencia de sequías con respecto a los patrones de humedad del suelo:

Los patrones espaciales definidos en el proceso de autocorrelación espacial del objetivo dos se comparan con el comportamiento espacial del fenómeno de sequía en América Central, en esta comparación se escogió el periodo más seco de la serie temporal de humedad de suelo. Para localizar los fenómenos de sequía y su frecuencia se utilizó como referencia la figura *Percentage Drought Recurrence in Central America* del artículo **Dynamical delimitation of the Central American Dry Corridor (CADC) using drought indices and aridity values** (Quesada *et al.*, 2019; pg. 12) en donde se realiza un mapeo de frecuencias de sequía según índices de sequía y aridez con una climatología que cubre el rango de años 1970 – 1999, estos datos fueron obtenidos directamente de los autores.

Para realizar la comparación de los patrones de humedad de suelo con las frecuencias de la sequía se realizó una sobreposición de ambas capas de información por medio de SIG y de esa manera identificar si las zonas secas corresponden o tienen una relación directa con las zonas donde frecuentemente se presenta el fenómeno de la sequía. Por último se definieron los municipios donde se presentara las siguientes dos condiciones: alta frecuencia de sequía y baja humedad de suelo.

Análisis espacial de las zonas agrícolas más representativas con respecto a los patrones de humedad de suelo:

Al igual que en el apartado anterior se realizó un análisis de los patrones de distribución de la humedad de suelo con respecto a las zonas agrícolas de más importancia en América Central, para establecer los cultivos más dominantes o representativos de la región se toma como referencia el reporte de Indicadores de Ciencia y Tecnología Agrícola (ASTI por sus siglas en inglés) para América Central, realizado por el Instituto Internacional de Investigación en Políticas Alimentarias en convenio con el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura; según este reporte (Stads *et al.*, 2008) los cultivos más representativos se presentan en la [tabla 2](#):

Tabla 2. Cultivos de mayor importancia en América Central según propósito.

Para alimentación	Para exportación
Arroz	Algodón
Frijol	Banano
Maíz	Cacao
Sorgo	Café
	Caña de azúcar
	Tabaco

Para localizar espacialmente y observar la magnitud de las zonas agroproductivas se usó los datos **Global Spatially-Disaggregated Crop Production Statistics Data for 2010 Version 1.0** antes descritos, se utilizó la categoría de área física cultivada (Physical Area) medida en hectáreas (ha). Estos datos se procesaron por medio de R ([anexo 6](#)) para obtener los valores de celda en puntos y generar mapas de calor en SIG; los mismos se compararon con el

patrón espacial de la humedad de suelo, de igual manera escogiendo el periodo más seco para la comparación por medio de la sobreposición de capas, con el objetivo de realizar una lectura de la dependencia de la humedad de suelo para la producción agrícola en América Central.

Identificar zonas – municipios potencialmente vulnerables a fenómenos de sequía:

En la **figura 8** se visualiza como a partir de los dos procedimientos anteriormente explicados se procedió a unir los resultados en donde los municipios que cumplen con condiciones de: **alta frecuencia histórica de sequías, alto porcentaje de área dedicada actividades agroproductivas y alto porcentaje de área con baja humedad del suelo** representan las zonas potencialmente más vulnerables ante los eventos de sequía.

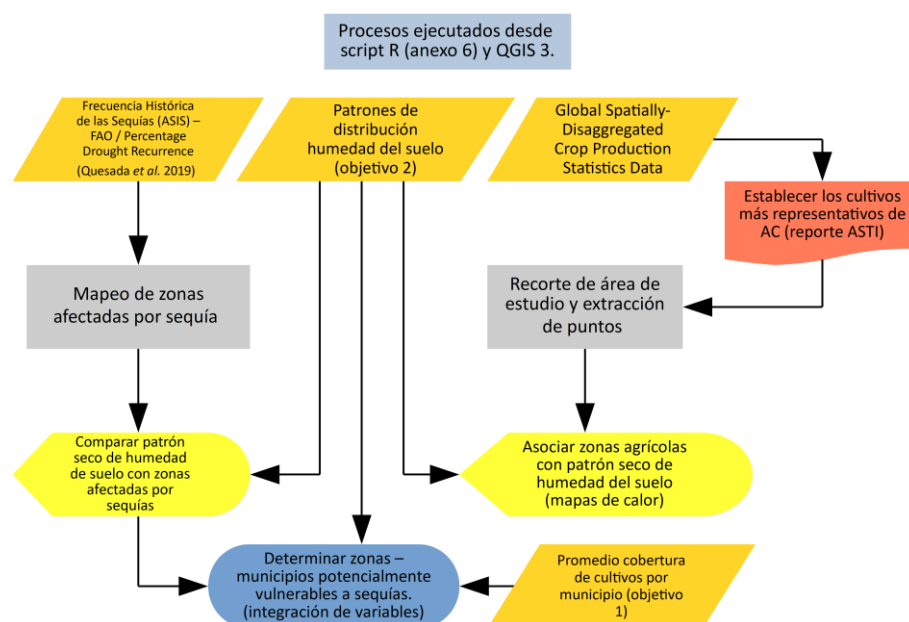


Figura 8. Diagrama de flujo con los procedimientos para determinar las zonas más vulnerables a los fenómenos de sequía.

Las entradas para realizar la estimación de estos municipios altamente vulnerables se definieron con las siguientes variables:

- Porcentaje espacial de frecuencia de sequía ([Quesada et al., 2019](#)): representa la concurrencia de las sequías en un lugar determinado, en otras palabras indica que del total de sequías ocurridas en el periodo 1970 – 1999 cuanto porcentaje de estas se presentó en un mismo lugar para el mismo período de tiempo, por medio de estadísticas de zona en SIG se extrajo el porcentaje promedio de concurrencia de sequías en los municipios.
- Porcentaje de área con cobertura cultivada: obtenido a partir de las estadísticas de zona aplicadas en el objetivo 1 con los datos de cobertura de [GLC-SHARE \(2014\)](#).
- Porcentaje de área con niveles significativamente bajos de humedad de suelo: obtenido a partir de los patrones de humedad de suelo calculado con el método I de Moran Local por estaciones, en la cual se escogió el periodo más seco. Posteriormente se realizó un cálculo porcentual de áreas por municipio tanto dentro de la zona seca y fuera de ella por medio de SIG.

Para realizar la integración de estas variables se utilizó un método de clasificación de variables (*ranked variable*) en las cuales cada una se ordena de mayor a menor porcentaje en donde el valor más alto correspondió a 1, el segundo más alto a 2 y así sucesivamente hasta completar los 1197 municipios en estudio para cada variable.

Al obtener la clasificación de todas las variables se procede a sumar los valores de las tres clasificaciones por cada municipio, suma en la cual un valor mínimo de 3 (municipio perfectamente vulnerable) y un valor máximo de 3591 (municipio con vulnerabilidad nula) representan los límites de la clasificación, el rango es de 3588 el cual se clasifica por deciles ([tabla 3](#)) para la representación gráfica según el valor sumado para cada municipio, en donde los municipios pertenecientes al decil 1 son los menos vulnerables y los pertenecientes al decil 10 son los más vulnerables.

Tabla 3. Clasificación por deciles según la suma de valores clasificados de 1 a 1197 por orden de mayor a menor porcentaje de cada variable.

Decil	Intervalos	Porcentaje	Decil
10	3	100	
	361,8	90	9
8	720,6	80	
	1079,4	70	
6	1438,2	60	5
	1797	50	
4	2155,8	40	3
	2514,6	30	
2	2873,4	20	1
	3232,2	10	
	3591	0	

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1 Objetivo 1. Procesar los datos de humedad de suelo, cobertura, precipitación y temperatura por sub-regiones y municipios

4.1.1 Procesamiento de datos, humedad del suelo por estaciones para América Central

Las representaciones gráficas de datos de humedad de suelo procesados, de resolución 1 km x 1 km, reflejan el comportamiento general tanto espacial como temporal de la humedad del suelo. Para su visualización se dividió por estaciones boreales ([figura 9](#)), en las que la primavera (MAM) y el otoño (SON) representa los dos extremos (periodo más seco y periodo más húmedo respectivamente) de valores para los promedios de humedad de suelo, el invierno (DEF) y verano (JJA) corresponden a transiciones entre estos periodos.

El rango de valores es de 0% a 70% observando cambios notables entre MAM y SON, en la primavera boreal solo se observa valores altos de humedad (60% - 70%) en la cordillera de Talamanca en Costa Rica, fenómeno que puede estar influenciado por la creación de nubes orográficas ([Kalmmarkar et al., 2011](#)). Los valores menores a 20% se presentan en una gran parte de la vertiente pacífica de América Central, zona coincidente con el denominado CSC. Por el contrario en el otoño boreal se observa la vertiente Caribe y la parte sur de América Central con valores altos de humedad del suelo, fenómeno ocasionado por el estacionamiento más septentrional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), los valores bajos quedan anegados la vertiente pacífica pero solo en zonas focalizadas, sur de Guatemala y Honduras, así como en la parte central de El Salvador; este último país es un caso especial ya que en su territorio posee muy pocas áreas húmedas, y la mayor parte del año su condición es de bajas cantidades de agua en el suelo.

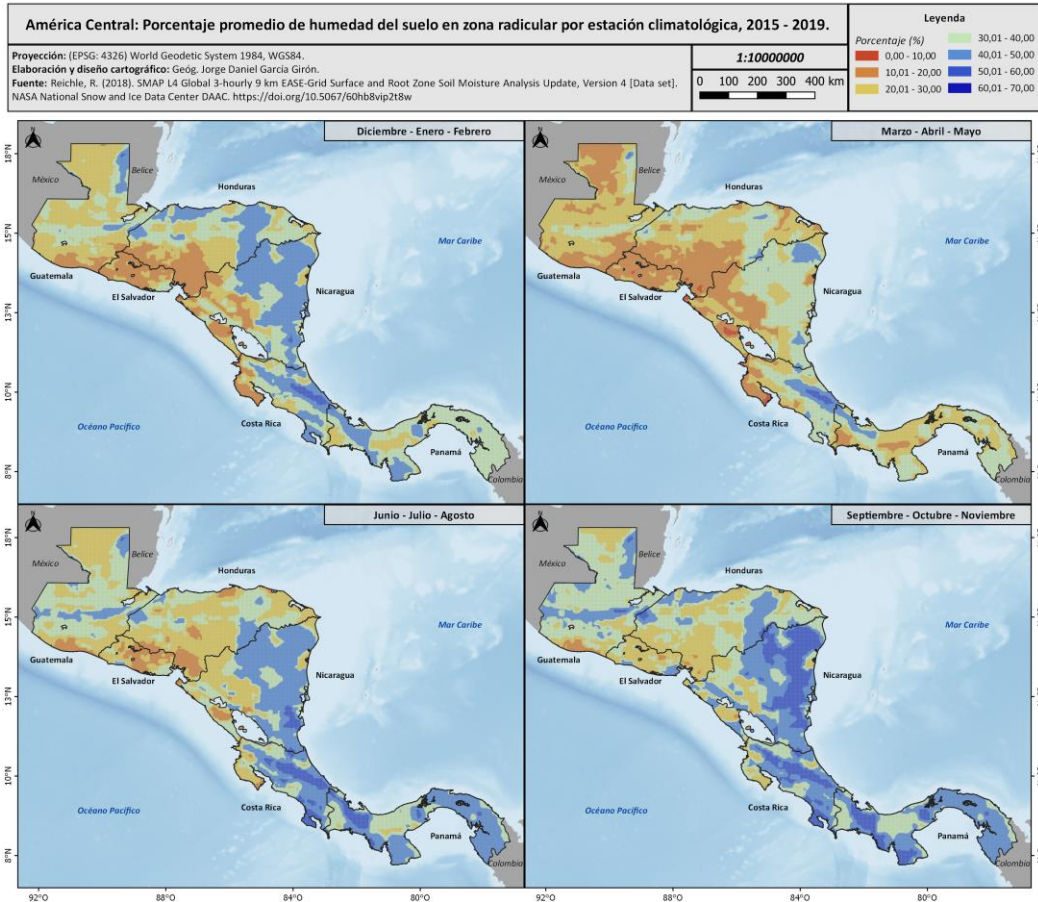


Figura 9. Porcentaje promedio de humedad del suelo en América Central por estación climática boreal.

También la serie temporal muestra una clara estacionalidad como se observa en la figura 10, el patrón temporal posee dos extremos, en el mes de abril se observa el punto más bajo de humedad de suelo tanto en el CSC como en el NO CSC, siendo el año 2019 el más seco con valores menores a 18% y ligeramente mayores a 25% de humedad de suelo en promedio para cada región respectivamente. Con respecto a las máximas estas varían entre los años y las regiones, en 2015 y 2016 se presentó máximas para el mes de noviembre fuera del CSC (~41% y ~42%), mientras que dentro del CSC se observó la máxima en octubre (~33% ambos años); en los años 2017 y 2018 los picos máximos corresponden a octubre en ambas regiones, CSC aproximadamente 35% y 34%, NO CSC aproximadamente 42% y 41%.

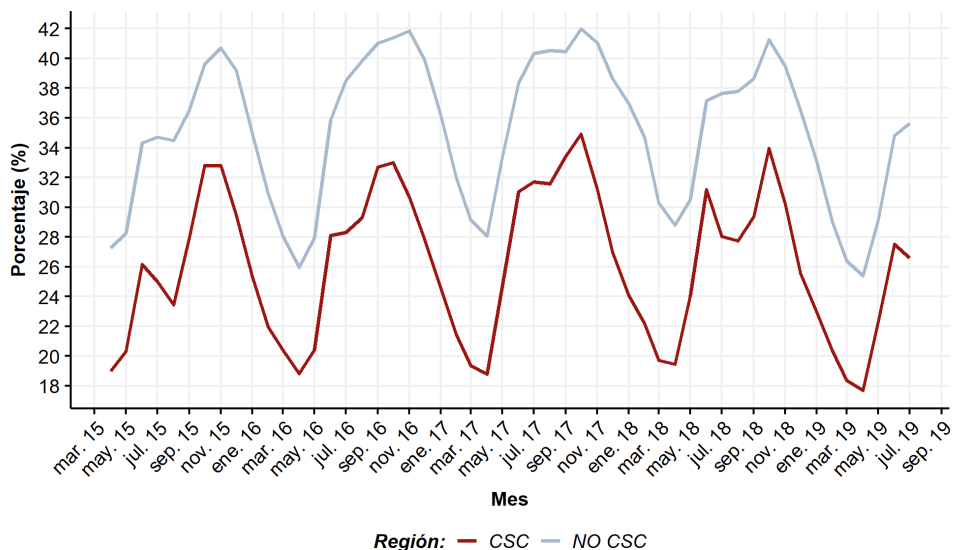


Figura 10. Serie temporal, porcentaje promedio de humedad del suelo por región.

Es visible una disminución para los meses de agosto dentro de la región CSC, esto podría deberse a la disminución de las precipitaciones debido al fenómeno de sequía de medio verano (MDS por sus siglas en inglés) (Magaña *et al.*, 1999; Karnauskas, 2013; Alfaro, 2014) conocido popularmente como “veranillo” o “canícula” (Vargas, 2001; Alfaro, 2014); la región NO CSC muestra una variación entre los años de este fenómeno, en 2015 y 2018 se observa la tendencia de disminución o estancamiento de humedad en el suelo, pero en 2016 y 2017 es menos fuerte o ausente esta disminución.

La razón de esta estacionalidad puede referirse a que la cantidad de humedad en el suelo refleja variaciones posteriores a los eventos de precipitación, ya que la capacidad de retención del suelo y los procesos de escorrentía sub-superficial son mucho más lentos que los superficiales.

4.1.2 Procesamiento de datos, coberturas vegetales para América Central

El comportamiento espacial de las coberturas vegetales en promedio representan fenómenos antrópicos, ecológicos y climáticos que se hacen presentes en la región, en la figura 11 se visualiza el resultado del proceso de vectorización de los datos promediados de grilla 1 km x 1 km de GLC-SHARE para el periodo 1998-2012.

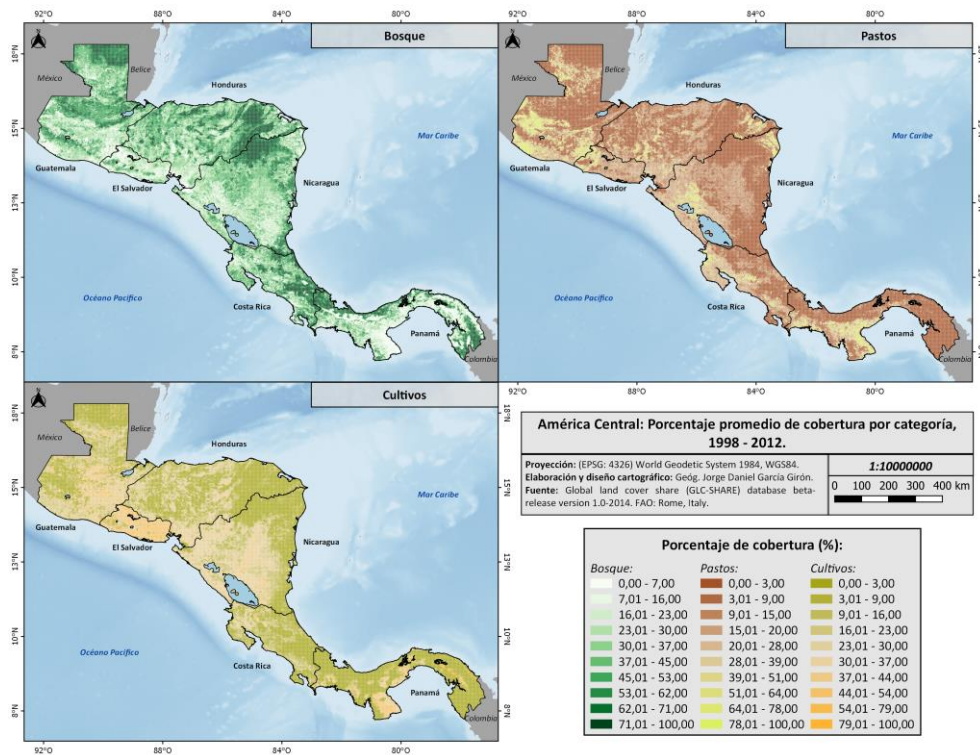


Figura 11. Porcentaje promedio de cobertura de bosques, pastos y cultivos en América Central.

Se observa en el caso de bosque las áreas fuertemente deforestadas en gran parte de la región, también los macro-parches de bosque: Parque Nacional del Darién (Panamá), Parque Internacional La Amistad (Panamá y Costa Rica), Refugio Nacional de Vida Silvestre Barra del Colorado (Costa Rica), Reserva Natural Bosawás - Reserva Biológica Indio Maíz (Nicaragua), Parque Nacional Patuca - Reserva Biológica Tawahka - Reserva Biológica Río Plátano (Honduras), Reserva de Biosfera Maya (Guatemala).

Con respecto a las zonas de pastos dominan gran parte de la vertiente del Pacífico de América Central, estos tipos de cobertura representan actividades ganaderas o grandes zonas de cultivo de gramíneas como la caña de azúcar, Guatemala es el principal productor de este producto en la región por lo cual los más altos porcentajes de esta coberturas se encuentran en su territorio (Melgar *et al.*, 2012), las zonas ganaderas en la provincia de Guanacaste en Costa Rica se logran denotar también en la figura 11.

Por último los cultivos siguen la misma tendencia que los pastos, su mayor presencia se nota en la vertiente del Pacífico, integrando muy significativas en El Salvador, sur de Panamá, gran parte de Guatemala, Honduras y Nicaragua; el país que visualmente posee menos cobertura de cultivos corresponde a Costa Rica, en parte por su mayor cantidad de cobertura boscosa.

4.1.3 Definición de municipios que pertenecen al CSC

La definición de los municipios que poseen una parte considerable dentro del CSC se llevó haciendo varias pruebas por medio de localización espacial, entre ellas la selección por centroide dentro de la geometría del CSC, entre otros métodos de selección por localización; estas no se ajustaban visualmente a los límites del CSC adoptados en esta investigación por lo cual se concretó en realizarlo por el porcentaje de área dentro y fuera de CSC.

En la [figura 12](#) se observa el resultado espacial de definir a los municipios con un área mayor o igual a 35% dentro del corredor como municipios CSC, se observa que a pesar de ser límites administrativos contrastados con una delimitación ecológica-natural, se ajustan aproximadamente a los límites de CSC. Estos municipios se tomaron como dos poblaciones diferentes para las pruebas de diferenciación estadística del objetivo 2; el listado completo de estos municipios se encuentra en el [anexo 7](#).

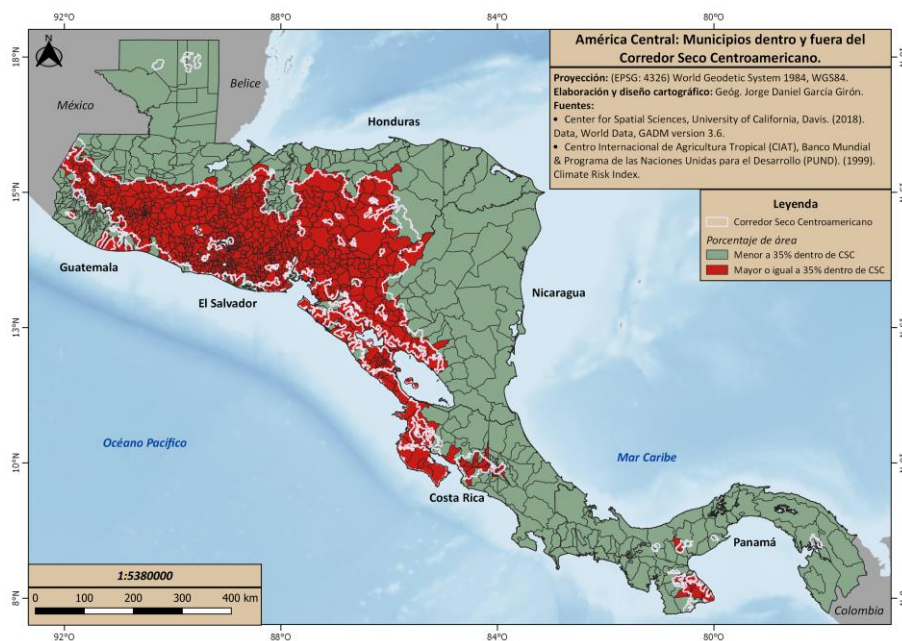


Figura 12. Municipios fuera y dentro de CSC.

4.1.4 Estadísticas de zona (media), humedad de suelo por municipio

El análisis por municipio muestra la humedad en el suelo promedio para cada uno por mes (figura 13), las variaciones temporales muestran a marzo y abril como los meses en donde más municipios experimentan menos humedad del suelo, mientras que octubre y noviembre representan el fenómeno contrario. En contexto espacial los municipios con menos humedad de suelo siguen la tendencia de disponerse en la vertiente del Pacífico y los más húmedos en la vertiente Caribe, es interesante observar que algunos municipios de Costa Rica mantienen los mismos niveles altos de humedad en el suelo a lo largo del año, este fenómeno solo ocurre en este país; por otro lado algunos municipios de El Salvador, Honduras y Guatemala no superan en promedio el 25% de humedad en los suelos ni en los periodos más húmedos.

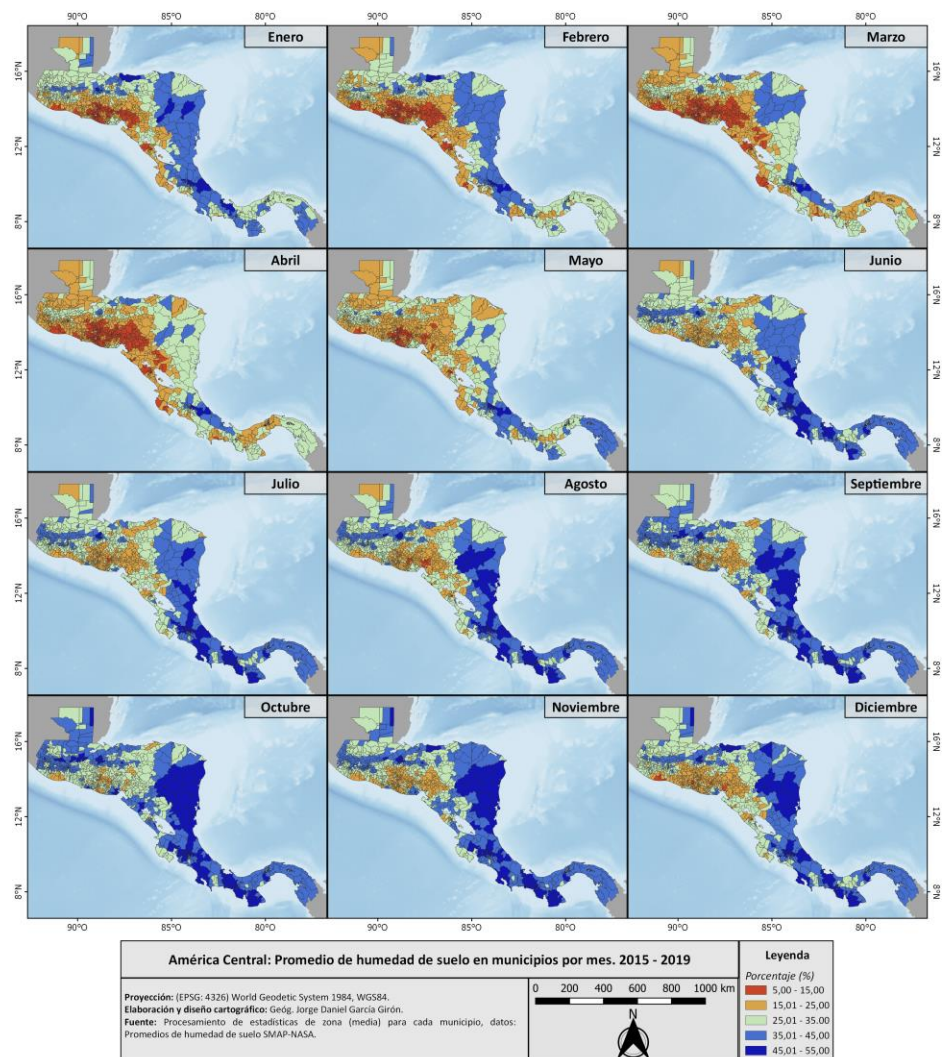


Figura 13. Porcentajes mensuales promedio de humedad del suelo en los municipios de América Central.

4.1.5 Estadísticas de zona (media), coberturas por municipio

Con respecto a cobertura el promedio por municipio refleja un contraste, esto por el uso de tierras para actividades productivas, se observa que el bosque es sustituido por pastos o cultivos, en general la ausencia de bosque representa la presencia de alguna de las otras dos coberturas. El patrón espacial observado en la figura 14 es de municipios agroproductores ubicados en la vertiente del Pacífico, mientras que municipios con un papel más de conservación de ecosistemas se encuentra en la vertiente Caribe.

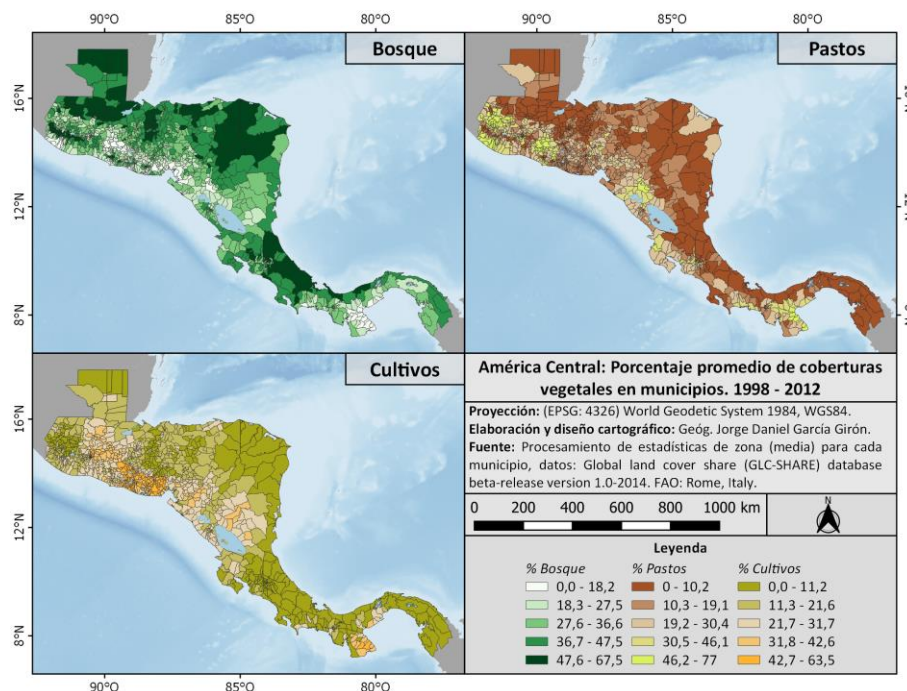


Figura 14. Porcentajes promedio de cobertura vegetal en los municipios de América Central.

Según Briassoulis (2009) y Li *et al.* (2016) la cobertura del suelo está determinado por una variedad de factores, entre físicos (clima, suelos, topografía, hidrología, geología) y socioeconómicos (uso del suelo, densidad de población, tecnología, políticas de territorio); siguiendo esta línea el proceso de realizar promedios por municipios puede indicar la dominancia de ciertas actividades en cada uno, por ejemplo un municipio con alto porcentaje de área dedicada a cultivos indica que su economía se basa en el sector primario así como las principales fuentes de empleo para sus pobladores, lo que en caso de presentarse un evento seco prolongado puede ocasionar dificultades sociales y económicas para el municipio.

4.1.6 Estadísticas de zona (media), precipitación por municipio

Las precipitaciones en la región como indica Kalmarkar (2011) están regidas espacialmente y temporalmente por fenómenos como sistemas convectivos, el ENOS, el CLLJ y la topografía. Por municipios (figura 15) se observa la disminución de precipitaciones en los meses de febrero marzo y abril, los meses de transición como mayo y noviembre, y los que poseen un aumento notorio como junio, septiembre y octubre.

La influencia de la ZCIT también determina el patrón de precipitaciones en los meses más lluviosos, la acción de las nubes orográficas provenientes de la humedad transportada por el CLLJ permiten que los municipios de la vertiente Caribe no presenten una ausencia definida de precipitaciones.

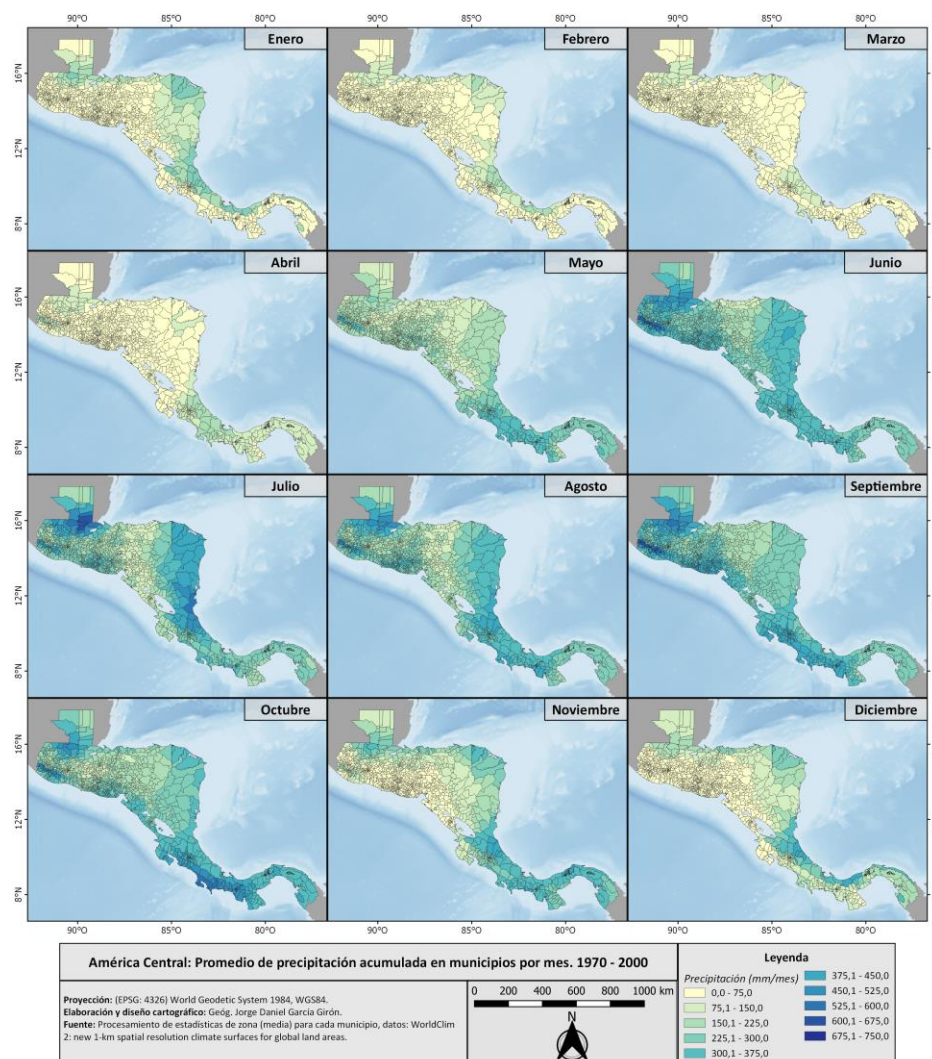


Figura 15. Precipitación mensual acumulada promedio para 1970 – 2000, en los municipios de América Central.

La cantidad promedio de lluvia acumulada por municipios puede tener una incidencia directa con la cantidad de agua almacenada en los suelos, dependiendo de la ubicación geográfica un municipio puede estar más propenso a precipitaciones o a una estación climática definida por lo cual el análisis llevado a cabo a través de las estadísticas de zona muestra los contrastes entre estas unidades geográficas en términos de precipitación.

4.1.7 Estadísticas de zona (media), temperatura de superficie por municipio

Aunque los cambios en la temperatura de la superficie en América Central no son tan considerables por su ubicación en la zona intertropical, es importante observar la dinámica mensual y espacial de estas variaciones, para así poder establecer si la humedad del suelo responde a los cambios promedio de temperatura en la superficie por municipios.

En la [figura 16](#) representa las variaciones promedio de la temperatura en superficie para cada municipio a lo largo del año; como la temperatura también está determinada por la elevación (factor principal de cambio en esta variable para la región intertropical), los municipios ubicados en los ejes montañosos representan los valores menores, por el contrario los municipios costeros o con grandes extensiones de topografía llana presentan los valores mayores.

El mes más caliente en superficie fue marzo, una de las razones para explicar este fenómeno es la coincidencia con el equinoccio de primavera en el hemisferio norte, el cual ocurre entre el 19 y el 21 de marzo, en este periodo el sol se ubica en su punto cenital con el ecuador terrestre, por lo que los rayos solares inciden perpendicularmente en la superficie y al no poseer interferencia por nubosidad debido a que en este periodo la ZCIT se encuentra entre 2° y 7° latitud norte ([CIOH, s.f.](#)), las temperaturas son mayores, por lo que la temperatura del suelo también tiende a aumentar.

Entre los meses con la superficie más fría se encuentran diciembre y enero, esto debido al aumento de presencia y velocidad de los vientos alisios, además del efecto de los frentes fríos provenientes de latitudes más septentrionales ([CIOH, s.f.](#)).

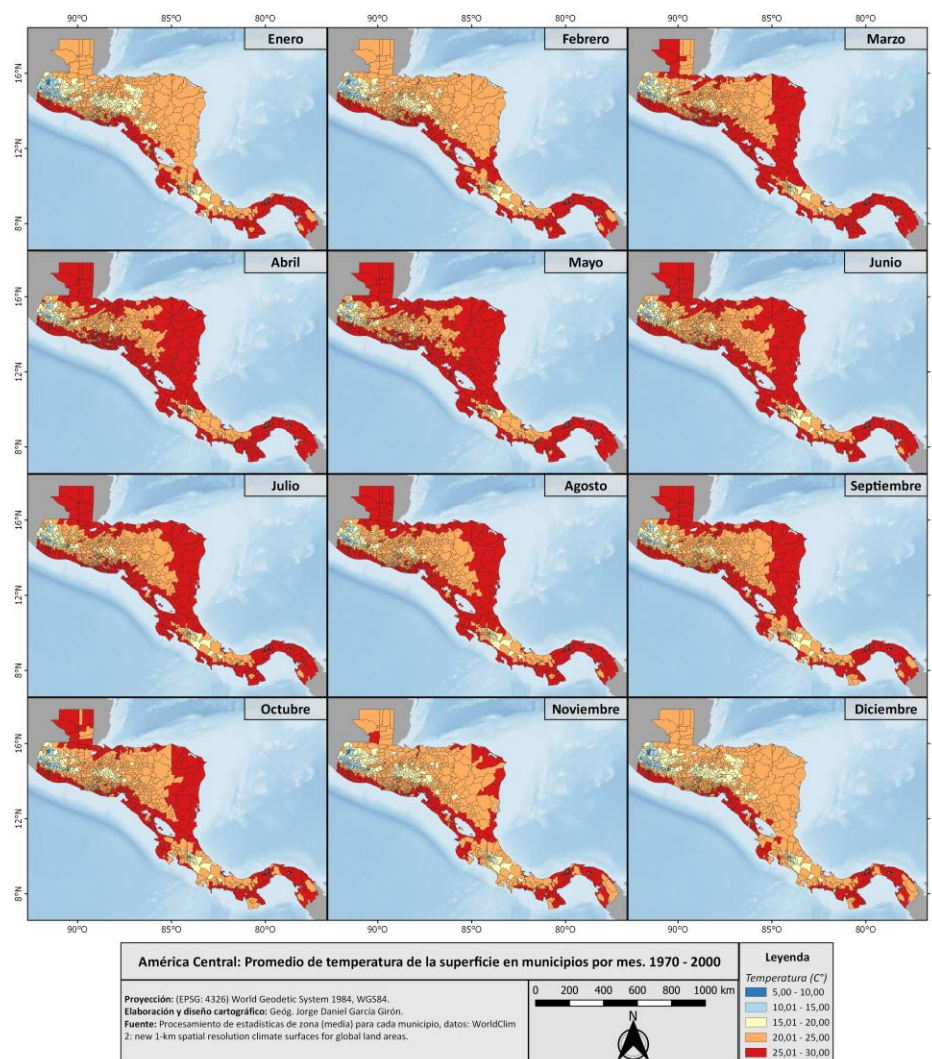


Figura 16. Temperatura promedio mensual para 1970 – 2000, en los municipios de América Central.

4.2 Objetivo 2. Identificar correlaciones entre la humedad del suelo y tres tipos de cobertura (bosque, pastos, cultivos) por municipio, diferencias entre regiones (CSC y NO CSC), y patrones de agrupamiento espacial

4.2.1 Correlaciones entre humedad de suelo y cobertura

Los cambios mensuales en la humedad del suelo se correlacionaron con el porcentaje de cobertura para cada municipio, obteniendo los siguientes resultados representados en la figura 17, a una significancia estadística del 95%; cabe indicar que los resultados son de un análisis local por unidad espacial (promedios por municipios obtenidos de las estadísticas de zona del objetivo 1), en los cuales se pueden presentar varios contextos geográficos.

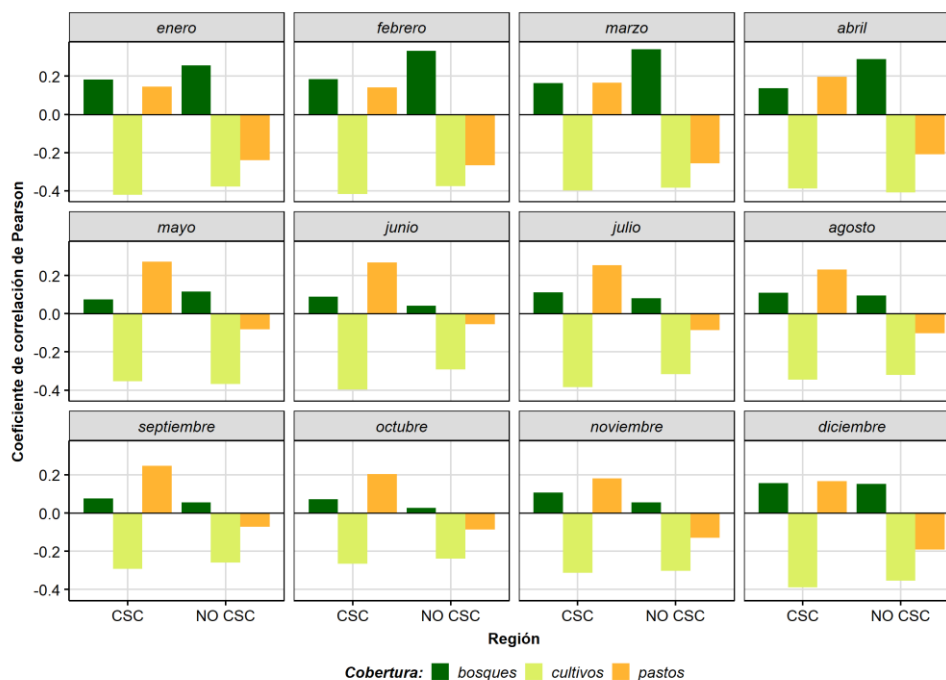


Figura 17. Correlaciones entre tipos de humedad del suelo y cobertura vegetal por mes, según región de estudio.¹

En general los resultados presentan correlaciones débiles entre ambas variables, lo que indica que gran parte de la varianza en la humedad de suelo está determinada por factores ajenos al tipo de cobertura, sin embargo se puede tener noción del comportamiento de la humedad de suelo en presencia de determinado tipo de cobertura vegetal, se observa que en coberturas forestales la humedad del suelo tiende a ser mayor en los meses más secos (febrero, marzo y abril), por el contrario en presencia de coberturas tipo cultivo la humedad del suelo disminuye principalmente entre diciembre - mayo en promedio.

El caso de la cobertura de pastos y gramíneas la correlación con humedad de suelo varía según la región, para la región CSC es positiva y aumenta ligeramente entre mayo y junio, lo que indica valores mayores de humedad de suelo en presencia de esta cobertura; contrastado con la región NO CSC en la cual la correlación es negativa, mayor entre enero y marzo. Estos resultados también se tienen que contrastar con la dimensión de cada

¹ Los resultados se obtienen a partir de un promedio de coberturas para el periodo 1998 – 2012 y un promedio por mes para el periodo 2015 – 2019 de humedad del suelo; para 1173 municipios.

cobertura en cada región, como se muestra en la [figura 21](#), para poder realizar comparaciones válidas entre las mismas.

[Martínez-González et al. \(2010\)](#) obtuvieron un valor de $r = 0.35$ al correlacionar la estructura y tipo de vegetación con los incrementos de la humedad en el suelo, la conclusión a la que llegan es que a mayor densidad y desarrollo vertical de la vegetación, mayor será el incremento de humedad en los suelos; con lo cual los resultados que se obtuvieron poseen validez, ya que la cobertura de mayor desarrollo (bosques) es la que posee mayor correlación positiva aunque no significativa.

En el caso de los cultivos la relación inversa obtenida para todos los meses y en ambas regiones sugiere que entre más cobertura agrícola la humedad de suelo tiende a disminuir, por lo cual las características de esta cobertura pueden propiciar los procesos de evaporación de agua en el suelo, al tener segmentos de suelo expuesto la incidencia solar eleva la temperatura de la superficie por lo que el contenido de humedad disminuye, caso contrario en las coberturas de bosque donde el dosel vegetal posee un mayor tamaño y desarrollo el cual no permite la incidencia directa de los rayos solares.

4.2.2 Pruebas de hipótesis para la diferenciación estadística entre CSC y NO CSC según municipios

Por medio de una serie de pruebas estadísticas básicas se buscó establecer si existen diferencias significativas entre las regiones de estudio tomando la población total de cada región, según los valores promedios por municipios, el total de unidades espaciales para cada región fueron las siguientes: región CSC = **812** municipios, región NO CSC = **361** municipios (totales excluyendo los municipios catalogados como urbanos, [anexo 4](#)).

Humedad del suelo:

Los resultados para la humedad del suelo se presentan en la [tabla 4](#), los resultados se interpretan bajo el supuesto de una hipótesis nula (H_0) y un nivel de significancia, la cual en este caso es **que la humedad del suelo no presenta diferencias entre ambas regiones**, por otra parte la hipótesis alternativa (H_1) expresa **que la humedad del suelo es diferente entre las regiones**, adoptando un nivel de significancia del 95% ($p = 0.05$). En resumen se puede observar que:

- Las distribuciones de los valores para ambas regiones y en todas las estaciones no se comportan de manera normal ([figura 18](#)).
- Las varianzas entre las regiones son homogéneas.
- Para ambas pruebas de diferenciación T y U, el resultado es el rechazo de hipótesis nula y adopción de hipótesis alternativa (ambas regiones poseen diferencias significativas, [figura 19](#)).

Tabla 4. Pruebas de hipótesis para la diferenciación estadística de la humedad del suelo dentro y fuera del Corredor Seco Centroamericano.

Prueba estadística	Resultado	
	CSC	NO CSC
Prueba de normalidad Shapiro-Wilk	P < 0.05	P < 0.05
Prueba de homocedasticidad Fligner-Killeen	P = 0.093	
Prueba T de Student	P < 0.05	
Prueba U Mann-Whitney	P < 0.05	

Los análisis se realizaron con promedios totales para las variables, sin embargo también se realizó las pruebas con la escala temporal de estaciones y de meses, obteniendo los mismos resultados. Las principales razones para estas diferencias entre regiones son la dinámica de precipitaciones y vientos en América Central; como se observó en la [figura 15](#), las precipitaciones poseen una mayor presencia en la vertiente Caribe a lo largo del año manteniendo la región NO CSC más húmeda, esto ligado a las lluvias generadas por la nubes orográficas que a su vez son formadas por el empuje de los vientos alisios; la región CSC

posee una estacionalidad de lluvias definida la cual influye en valores menores de humedad de suelo esto determinado a la variación espacial mensual espacial de la ZCIT y a fenómenos como el ENOS.

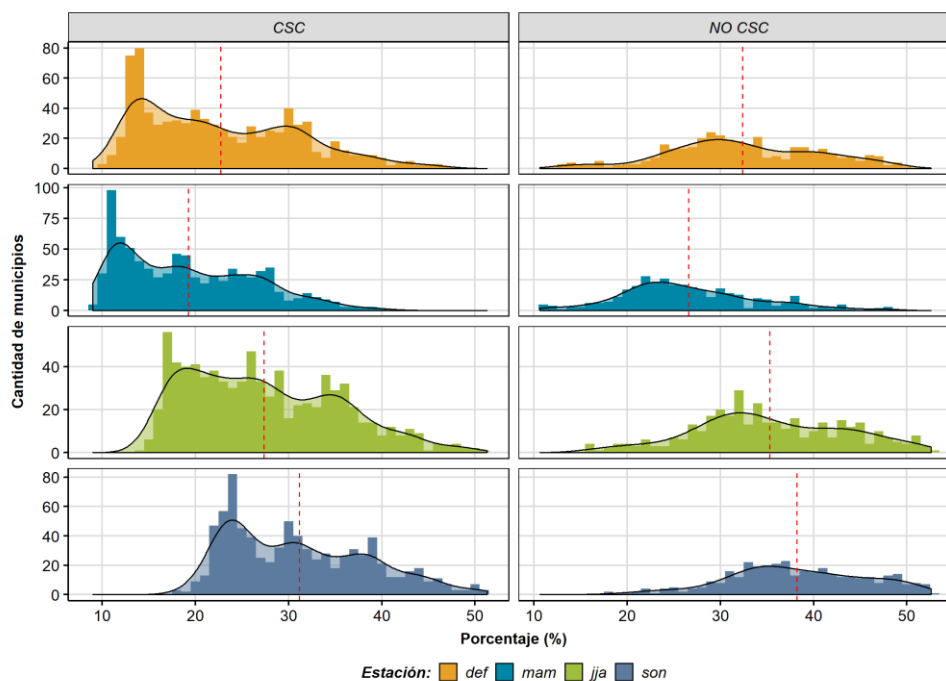


Figura 18. Distribución porcentajes promedio de humedad de suelo según estación climática en municipios, por región.²

En la figura 18 se observa como la media fluctúa entre estaciones, en el anexo 8 también se puede ver esta fluctuación por meses, las distribuciones tienden a ser asimétricamente positivas donde existe una mayor frecuencia de valores por debajo de la media, este comportamiento es más evidente en la región CSC. La diferencia de humedad en el suelo entre ambas regiones se observa en la figura 19, en promedio esta diferencia ronda entre 7% y 10 %, siendo más fuerte en el invierno boreal, periodo donde las precipitaciones en la costa del Pacífico disminuyen considerablemente y la costa Caribe recibe la humedad transportada por los vientos alisios.

² Los resultados se obtienen a partir de un promedio por mes y municipio para el periodo 2015 – 2019 de humedad del suelo; para 1173 municipios; la línea punteada roja representa el valor promedio para cada conjunto de datos.

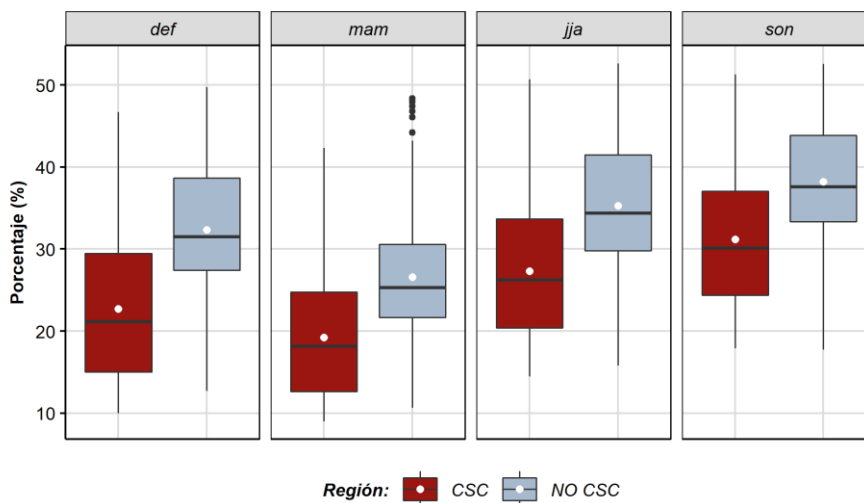


Figura 19. Gráfico de cajas: porcentajes promedio de humedad de suelo según estación climática, por región.³

Cobertura:

Con respecto a los tipos de cobertura vegetal los resultados se indican en la [tabla 5](#), se consideraron las siguientes hipótesis, con una significancia del 95%: **H₀ = Las coberturas vegetales entre ambas regiones no se diferencian significativamente**, **H₁ = Las coberturas vegetales poseen diferencias significativas entre las regiones**. Al igual que la humedad del suelo las coberturas vegetales presentan distribuciones no normales ([figura 20](#)); los pastos poseen varianzas homogéneas para ambas regiones, mientras que los bosques y cultivos difieren en sus variaciones; para T y U las diferencias entre ambas regiones son significativas ([figura 21](#)).

³ Los resultados se obtienen a partir de un promedio por mes y municipio para el periodo 2015 – 2019 de humedad del suelo; para 1173 municipios; el punto blanco representa el valor promedio para cada conjunto de datos.

Tabla 5. Pruebas de hipótesis para la diferenciación estadística de cobertura vegetal dentro y fuera del Corredor Seco Centroamericano.

Prueba estadística	Resultado					
	Bosque		Pastos		Cultivos	
	CSC	NO CSC	CSC	NO CSC	CSC	NO CSC
Prueba de normalidad Shapiro-Wilk	P < 0.05	P < 0.05	P < 0.05	P < 0.05	P < 0.05	P < 0.05
Prueba de homocedasticidad Fligner-Killeen	P < 0.05		P = 0.85		P < 0.05	
Prueba T de Student	P < 0.05		P < 0.05		P < 0.05	
Prueba U Mann-Whitney	P < 0.05		P < 0.05		P < 0.05	

Para describir las diferencias de coberturas vegetales entre las regiones se debe revisar los antecedentes históricos de los modelos de desarrollo económico llevados a cabo a mediados y finales del siglo XX (modelo agroexportador y ganadería extensiva, respectivamente) los cuales ocasionaron la expansión de la frontera agrícola en América Central (Imbach *et al.*, 2017), esta expansión se extendió alrededor de los principales asentamientos humanos de la región a lo largo de la costa del Pacífico.

En la [figura 20](#) se observa que los cultivos poseen un comportamiento desigual, dentro de CSC la asimetría es negativa, y fuera de CSC es positiva, lo que indica una mayor presencia en CSC; con los pastos la asimetría se comporta igual para ambas regiones (asimetría positiva) lo que indica poca presencia, por último los bosques se observa la dominancia fuera de CSC con la asimetría negativa, y una menor componente dentro de CSC reflejado en asimetría positiva.

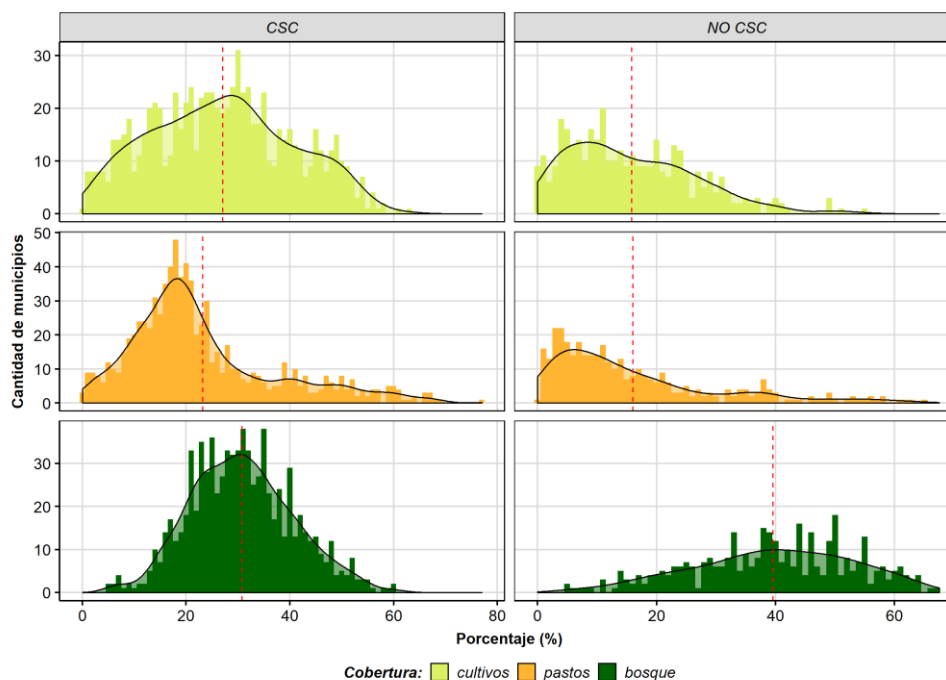


Figura 20. Distribución de porcentajes promedio según tipo de cobertura en municipios, por región.⁴

Por último se contrastan las distribuciones por medio de gráficos de cajas (figura 21), en donde se ve la dominancia de pastos y cultivos para CSC, y Bosque para NO CSC; las diferencias de cobertura entre medias regionales rondan para cultivos 11%, pastos 7% y bosque 9%. Es válido recordar que estos valores al igual que la humedad del suelo representan los promedios espaciales por municipio.

⁴ Los resultados se obtienen a partir de un promedio de coberturas para el periodo 1998 – 2012; para 1173 municipios; la línea punteada roja representa el valor promedio para cada conjunto de datos.

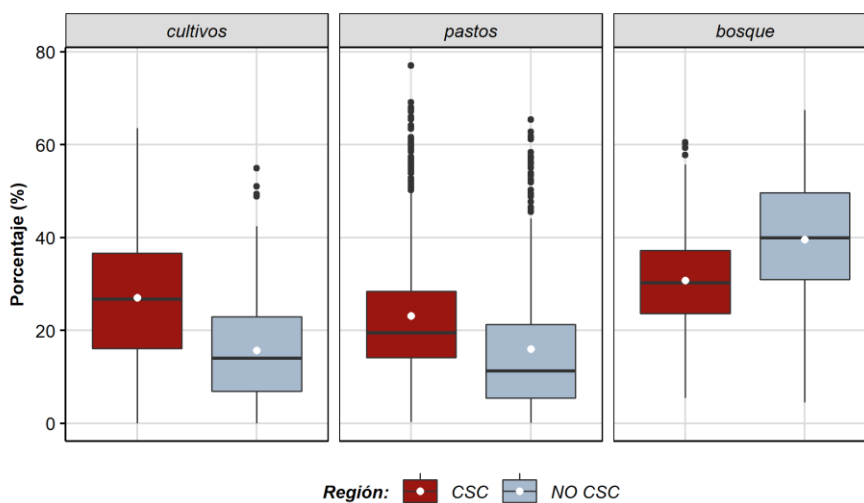


Figura 21. Gráfico de cajas: porcentajes promedio según tipo de cobertura, por región.⁵

4.2.3 Patrones de distribución (I moran local al 95% de significancia)

El procesamiento llevado a cabo con el método de autocorrelación espacial I de Moran en su modalidad local, se realizó con unidades geográficas de celdas/píxeles para de esta forma determinar más adecuadamente los patrones de distribución de las variables de humedad de suelo y cobertura, como se mencionó en los procedimientos metodológicos se estableció pesos de contigüidad de primer orden tipo reina (8 vecinos), para la humedad de suelo se trabajó por estaciones y para cobertura vegetal se realizó por tipo.

Humedad de suelo:

Como se observa en la figura 22, se establece el patrón espacial de la humedad del suelo para cada estación, obteniendo patrones de distribución agrupados o clúster, los valores bajos de humedad se representan de color rojo y los altos de color azul, las zonas en blanco no son significativamente definidas en un tipo de clúster debido a su valor y a los de su vecindario.

⁵ Los resultados se obtienen a partir de un promedio de coberturas para el periodo 1998 – 2012; para 1173 municipios; el punto blanco representa el valor promedio para cada conjunto de datos.

Para todas las estaciones el patrón es similar, con tendencia de un agrupamiento de valores bajos de humedad de suelo en la vertiente del Pacífico, coincidente en ciertos tramos con la delimitación del CSC; por el contrario en la costa Caribe se presentan agrupación de valores altos.

Estos patrones fluctúan ligeramente entre estaciones, se le atribuye interés a la estación MAM ya que es la que se presenta menor cantidad de precipitación y temperaturas más altas en superficie, además los valores de humedad de suelo más bajos del año se presentan en estos meses; por lo que el patrón seco de esta estación fue considerado para analizar las dinámicas agroproductivas y la frecuencia de sequías de la región en el objetivo 3.

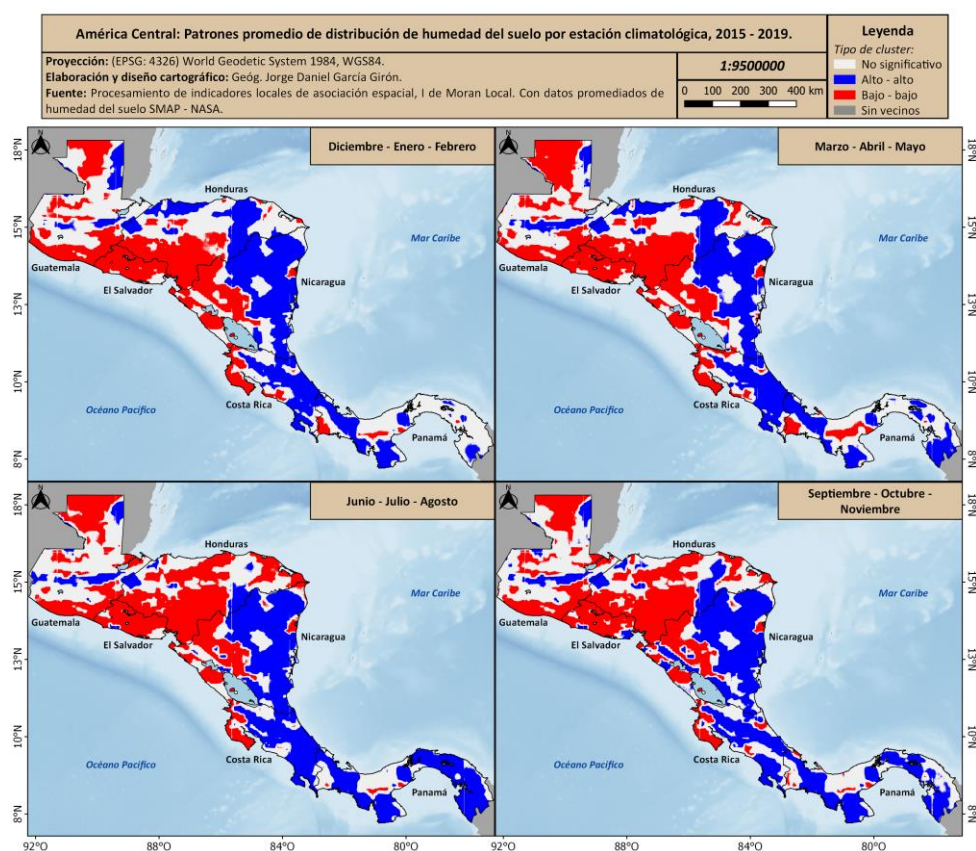


Figura 22. Patrones de distribución espacial de la humedad del suelo por estación en América Central, promedio para el periodo 2015-2019.

Cobertura:

Lo patrones espaciales de cobertura muestran en la [figura 23](#), los resultados de las pruebas de hipótesis realizadas con anterioridad se refuerzan al observar la disposición de tierras productivas (cultivos y pastos) en la vertiente del Pacífico y tierras de conservación (bosques) en la zona del Caribe aunque se observa un patrón bastante fragmentado.

Al igual que en el caso de la humedad de suelo, se atribuye interés al patrón espacial de la cobertura de cultivos para analizar en el objetivo 3, ya que representa el modo de subsistencia de muchos pobladores de la región, así como la actividad económica principal de determinados municipios ([Imbach et al., 2017](#)).

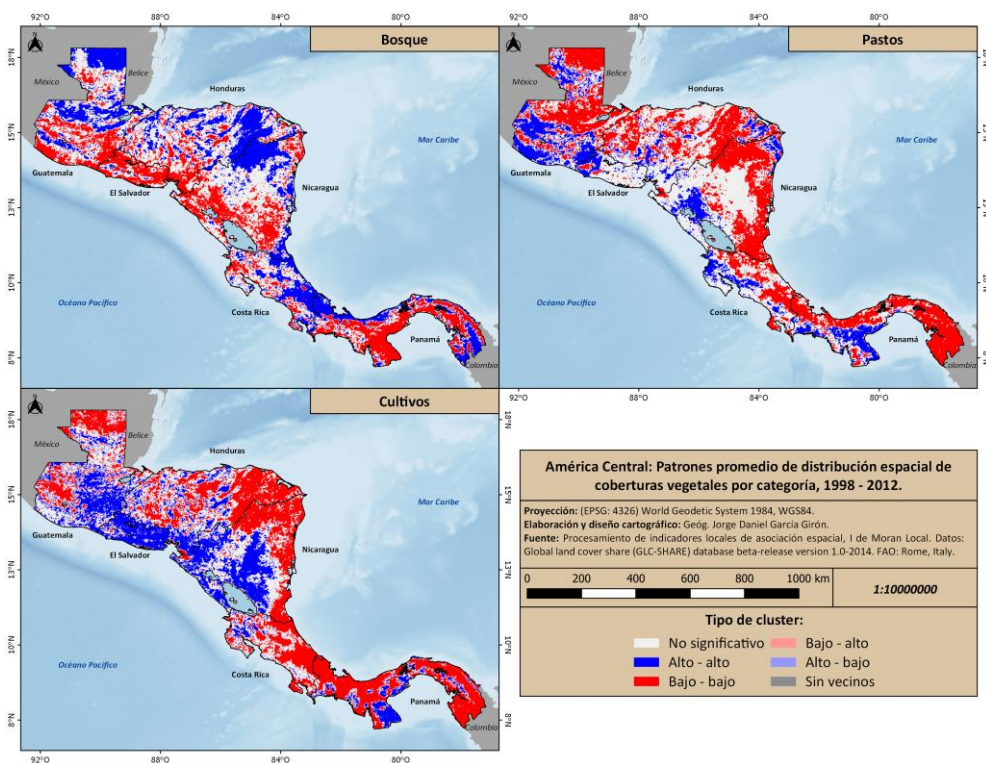


Figura 23. Patrones de distribución espacial de las coberturas vegetales en América Central.

4.3 Objetivo 3. Contrastar la distribución espacial de la humedad de suelo con las características climáticas, las zonas afectadas por sequías y las zonas agroproductivas de América Central

4.3.1 Prueba de correlación entre humedad de suelo temperatura y precipitación

La humedad del suelo como lo describe Legates *et al.* (2010) está relacionada con muchos componentes del espacio geográfico como el clima, los suelos, la geomorfología, los ecosistemas y los intercambios de energía entre las especies vegetales. Se realizó una correlación de la humedad de suelo con la precipitación y la temperatura se la superficie promediados espacialmente por municipio, para observar si la tendencia de estas dos variables en los municipios pueden afectar la presencia de mayor o menor humedad del suelo así como su distribución. En la figura 24 se muestran los resultados de las correlaciones:

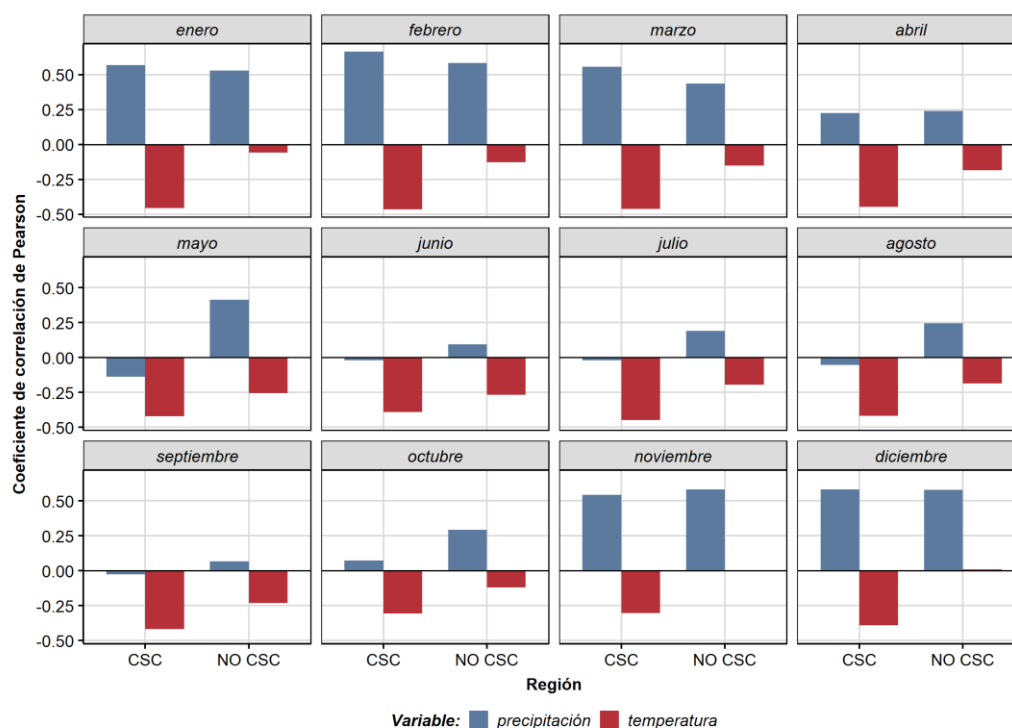


Figura 24. Correlaciones entre humedad del suelo y variables climáticas por mes, según región de estudio.⁶

⁶ Los resultados se obtienen a partir de una climatología para el periodo 1970-1999 y un promedio por mes para el periodo 2015 – 2019 de humedad del suelo; para 1173 municipios.

En el análisis por regiones se puede observar como fuera del CSC la precipitación siempre se mantiene en relación positiva con la humedad del suelo, significativamente más fuerte a finales y principios del año (con otro pico positivo en mayo), por lo que en los municipios donde ocurre mayor precipitación será también el de los suelos más húmedos.

Dentro del CSC se observan correlaciones significativas positivas para los meses con menor precipitación (noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo), el caso de abril y octubre la correlación sigue siendo positiva pero no significativa y para los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre la correlación se convierte en negativa no significativa.

Donde la correlación entre precipitación y humedad de suelo es positiva estos resultados concuerdan con las observaciones localizadas de [Findell \(1997\)](#) y [Bonilla et al. \(2002\)](#), en este caso realizadas con un dominio espacial y temporal mucho más amplio (ver nota al pie 6), sin embargo los resultados de correlación negativa pueden estar explicados por dos razones: [Yang et al. \(2018\)](#) atribuye la retroalimentación negativa entre humedad del suelo y precipitación a los procesos de evapotranspiración, mientras que [Shreve](#) en uno de los primeros estudios que analizó la humedad de suelo y su relación con la precipitación (1914) afirma que las zonas tropicales al mantener porcentajes tan altos y constantes de humedad del suelo no determina la distribución de las plantas o vegetación, caso que podría reflejarse también en la precipitación, ya que al mantenerse tan húmedo el suelo constantemente en la época lluviosa, las zonas donde llueve en mayor o menor cantidad no van a determinar variaciones de humedad en el suelo.

En el caso de la temperatura las correlaciones fuera de CSC poseen una tendencia negativa no significativa en todos los meses exceptuando noviembre y diciembre, en el caso interno de CSC la tendencia es igual para todos los meses del año, observando una ligera mayor significancia entre enero y marzo. Estos resultados se reafirman con los hallazgos de [Lakshmi et al. \(2003\)](#) y [Jin & Mullens \(2014\)](#) en donde la humedad del suelo disminuye

conforme aumenta la temperatura en la superficie, dado los procesos de absorción de energía y a la evaporación del contenido de agua en el suelo.

4.3.2 Localización de cultivos y zonas menos húmedas de América Central

Las actividades agrícolas en la región representan un 8.7% del PIB en promedio ([Banco Mundial, 2017](#)) cada país posee una mayor o menor dependencia a este sector de la economía, su importancia también radica en los pobladores y familias que se dedican a este sector, que según [Stads et al. \(2008\)](#) para 2006 más de la mitad de la población económicamente activa de las zonas rurales de América Central tenían un empleo relacionado con la agricultura.

Históricamente se ha desarrollado la agricultura de región en dos enfoques, productividad agrícola para la exportación y para el consumo interno ([Soria, 1976](#)). Cada cultivo requiere de un contexto geográfico particular para su desarrollo, entre ellos la humedad del suelo es un parámetro trascendente. Se utilizó la representación cartográfica con mapas de calor para focalizar la producción de determinados cultivos de importancia económica y de seguridad alimentaria para la región, contrastando con el patrón de distribución de humedad de suelo que se obtiene en los meses más secos (marzo, abril, mayo) en América Central; se obtuvieron los siguientes resultados por enfoque de producción:

Alimenticios: maíz, frijoles, arroz, sorgo

Los cultivos que representan la seguridad alimentaria para América Central históricamente se le han atribuido a los granos básicos, arroz, frijol, maíz ([Espíndola et al., 2005](#)) y sorgo; los niveles de “calor” se representan como rojo (alta producción) y morado (nula producción), las áreas tenues representan las zonas significativamente más húmedas y las zonas sin tonalidad representan las significativamente menos húmedas ([figura 25](#)).

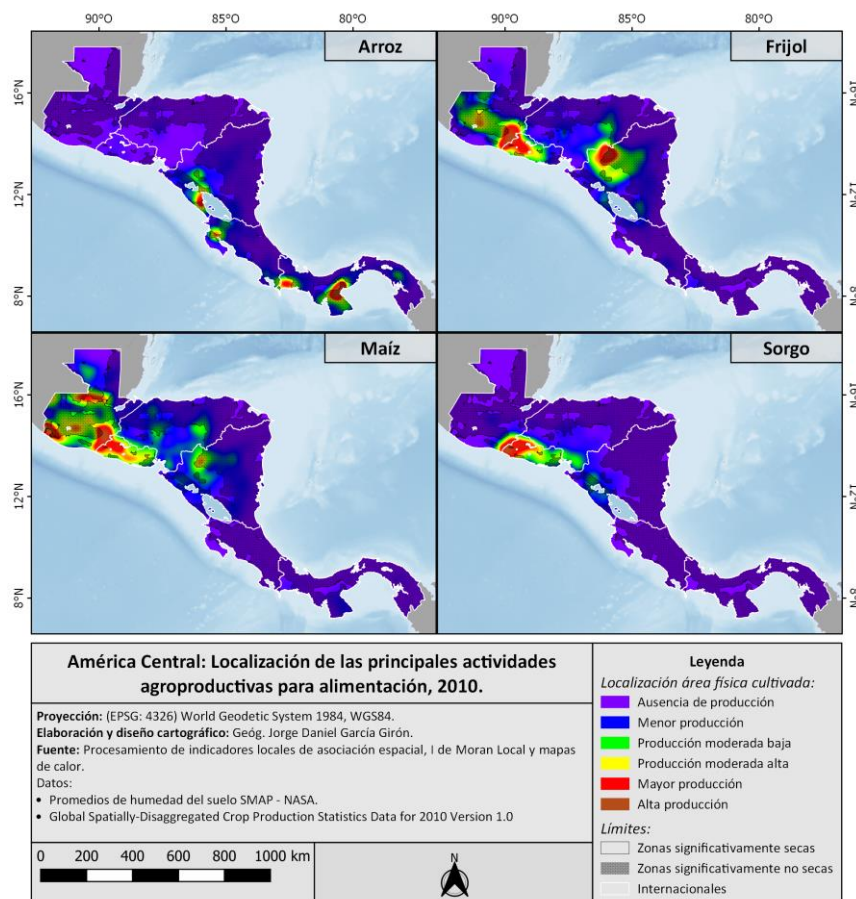


Figura 25. Localización por densidad de área cultivada, de los cultivos más representativos para consumo interno.

Imbach *et al.* (2007) realiza una descripción textual general de la ubicación de los cultivos que depende la seguridad alimentaria de la región, mas no se realiza una representación cartográfica, sin embargo los patrones observados en la figura 25 y lo descrito por el autor son coincidentes. El maíz cultivado en una amplia mayoría al norte de América Central se localiza en Guatemala y El Salvador la mayor producción, esta a su vez se ubica en zonas que recurrentemente poseen menores valores de humedad en el suelo, los otros focos de producción se encuentran rodeando el patrón espacial del suelo menos húmedo.

En el caso del frijol se asemeja mucho al patrón de producción espacial del maíz, Guatemala, El Salvador y Nicaragua figuran como los países de alta producción en las zonas significativamente menos húmedas, la parte central de Honduras posee una producción moderada por su parte Costa Rica y Panamá no poseen producción considerable de frijol.

Con respecto al sorgo, la producción se focaliza en El Salvador en su totalidad el sorgo se produce en zonas relativamente bajas en humedad de suelo, en el caso del arroz su producción se remite a Nicaragua, Costa Rica y Panamá, todos los focos productivos se encuentran dentro o muy cercanos a la zona con humedad del suelo reducida.

Para exportación: café, caña de azúcar, banano, cacao, algodón, tabaco

El enfoque agroproductivo para la exportación (figura 26) los productos históricos más comunes en la región son el algodón, banano, café, cacao, caña y tabaco (Soria, 1976; Stands *et al.*, 2008), los tonos y estilo de las áreas aplican de igual manera que los de la representación de cultivos para alimentación (figura 25).

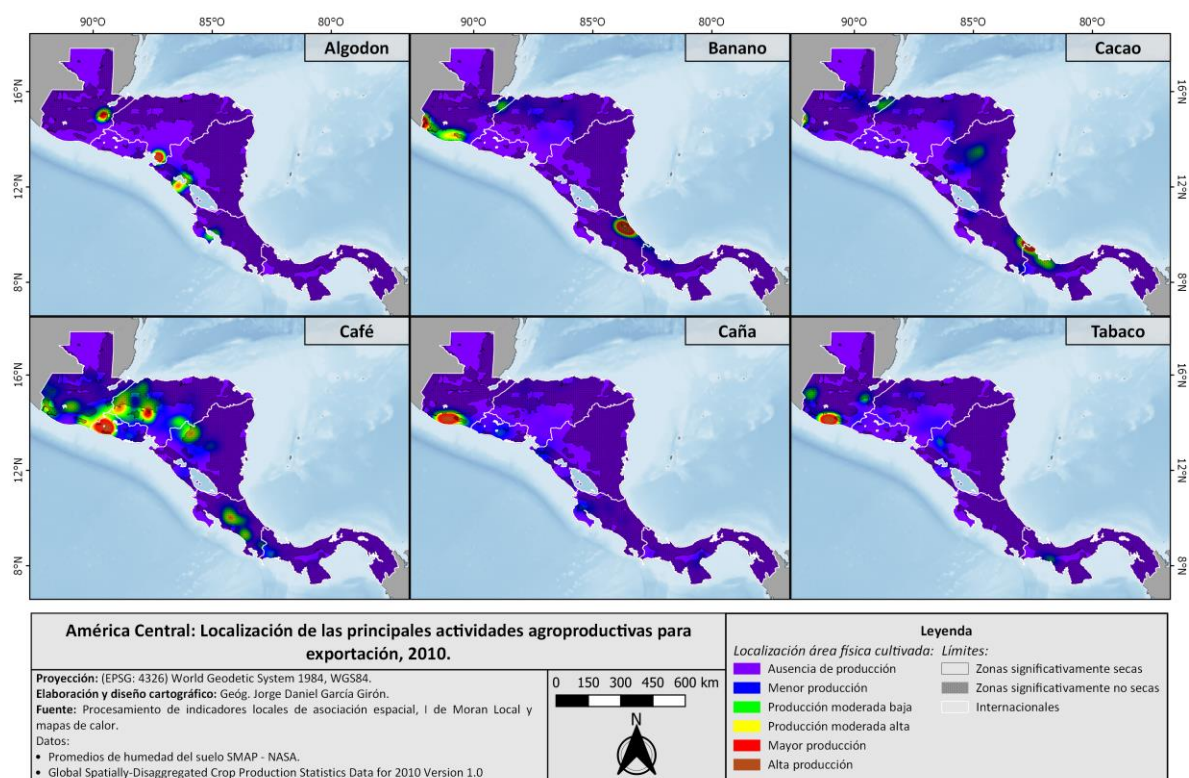


Figura 26. Localización por densidad de área cultivada, de los cultivos más representativos para exportación.

Los cultivos para exportación por lo general no poseen continuidades geográficas muy extensas en comparación con los cultivos para consumo interno, por el contrario los puntos de producción se focalizan en áreas determinadas donde se posee la infraestructura necesaria para la optimización de la producción. En el caso del algodón se observan cuatro

focos de producción, tres de ellos completamente dentro del área con menor humedad de suelo.

Por su lado el cultivo del banano se agrupa en la costa Caribe y zona norte de Costa Rica (en zonas por lo general húmedas), el otro foco de producción se ubica al sur de Guatemala, es este contexto espacial si se encuentra dentro de la zona de suelos menos húmedos. En la producción de cacao todos sus focos principales se encuentran en las zonas más húmedas.

El café es el cultivo de exportación de mayor desarrollo y el de más ingreso monetario en América Central (FAO, 2012; citado por Imbach *et al.*, 2017), como se puede observar es ampliamente cultivado en Guatemala, El Salvador, Honduras, parte de Nicaragua y Costa Rica; sus focos de producción se distribuyen entre áreas de menor y mayor humedad en toda la región. En Panamá la producción es menor y se encuentra en el oeste del país, cercano a la frontera con Costa Rica.

Por último los cultivos de tabaco y caña se desarrollan con más dominancia en Guatemala, al sur en la costa del Pacífico ambos, también en zonas con contenido de humedad en el suelo bajo, en el resto de América Central la producción de caña es representativamente baja.

4.3.3 Localización de frecuencia de sequías y zonas más secas de América Central

Como parte del análisis de la humedad de suelo en el entendimiento de algunos fenómenos climáticos transitorios como la sequía se comparó, el patrón espacial de los valores bajos en humedad de suelo, con la frecuencia de sequías derivada de una climatología e índices de sequía, investigación realizada por Quesada *et al.* (2019).

En la [figura 27](#) se observa la sobreposición de capas, la zona tenue corresponde como en las anteriores figuras a las zonas significativamente húmedas, mientras que las zonas sin sombreados son las de menores valores de humedad en el suelo. La clasificación de la capa

de frecuencia de sequías se realizó de la misma manera que la clasificaron los autores en la publicación original, por deciles porcentuales de 30% hasta el 100%.

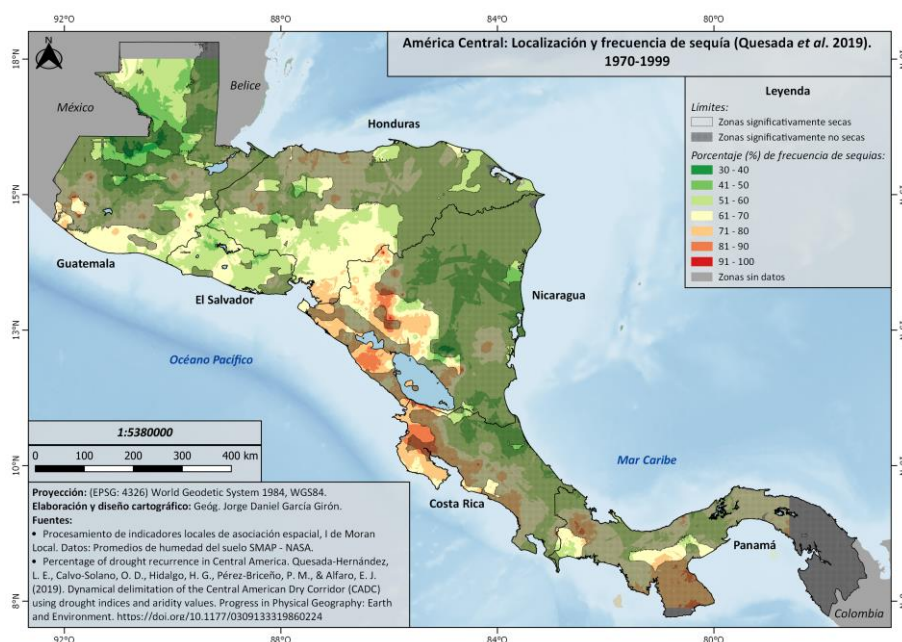


Figura 27. Localización y frecuencia de sequías en América Central.

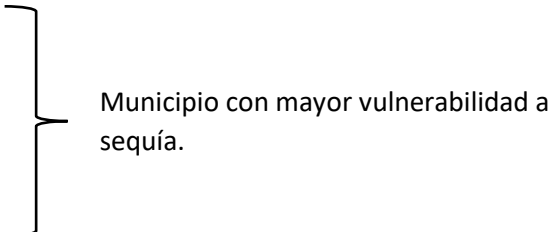
Las zonas con mayor frecuencia de sequías se distribuyen espacialmente a lo largo de la vertiente del Pacífico (Quesada et al., 2019), como se puede observar los lugares más críticos corresponden a la península de Azuero en Panamá, península de Nicoya y provincia de Guanacaste en Costa Rica, los lagos sus alrededores en Nicaragua, y en puntos focalizados de Honduras y Guatemala.

Espacialmente se pueden observar coincidencias entre el patrón de distribución de baja humedad del suelo y la frecuencia de sequías, dentro de este patrón espacial se obtuvo que, en las ocasiones que hubo sequías entre 1970 y 1999 en promedio se presentaron un 63% en esta zona, con lo que se puede relacionar las condiciones de humedad de suelo pueden favorecer o potenciar fenómenos de sequía.

4.3.4 Porcentaje de vulnerabilidad de municipios ante eventos secos

El último resultado que deriva de los demás antes descritos es la integración de variables para determinar la vulnerabilidad ante eventos secos a la que se encuentra una unidad espacial como los municipios con su organización de gobierno local; las variables como se mencionó en la metodología son: porcentaje de área dentro de patrón espacial de baja humedad de suelo, porcentaje promedio de área dedicada a cultivos y porcentaje promedio de frecuencia de sequías.

Los valores se trabajaron todos como porcentajes promedio por municipio, en donde los porcentajes más altos de cada variable indican más vulnerabilidad ante eventos de sequía para un municipio en particular, partiendo de esta premisa se plantea un escenario donde:

- Mayor % de frecuencia de sequías
 - Mayor % de área dedicada a cultivos
 - Mayor % de área dentro del patrón de baja humedad de suelo
- 
- Municipio con mayor vulnerabilidad a sequía.

El la [figura 28](#) se observa el resultado de la integración de las variables, el porcentaje expresado es el valor de vulnerabilidad por cada municipio con base exclusivamente a estas tres variables, las cuales al contemplar clima, producción agrícola y humedad del suelo representaría la exposición a sequía agrícola.

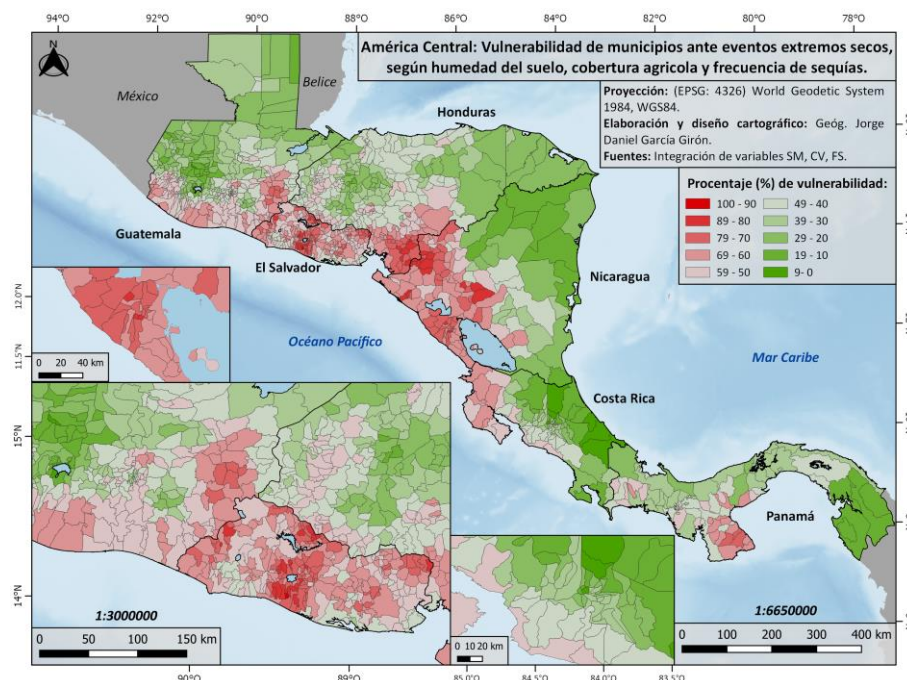


Figura 28. Vulnerabilidad de municipios de América Central a la sequía agrícola.

Los resultados reflejan coherencia espacial con otros estudios realizados en la región sobre sequía en zonas agrícolas (Chen *et al.*, 2016), el riesgo exposición y vulnerabilidad ante sequías (Carrao *et al.*, 2016) y con la delimitación del CSC (CIAT - Banco Mundial - PNUD, 1999). Las zonas más vulnerables se localizan en la vertiente del Pacífico, en un grado mayor las aproximaciones al Golfo de Fonseca como lo describió también Birkel (2005), El Salvador presenta una condición crítica ya que todos sus municipios presentaron un nivel de vulnerabilidad que sobrepasa el 50%, el sur de Guatemala y Honduras presentan las mismas condiciones.

El caso de Nicaragua, los municipios en mayor condición de vulnerabilidad se localizan al centro del país y toda su costa del Pacífico; Costa Rica presenta a la provincia de Guanacaste como la zona más vulnerable, así como algunos municipios de su costa central del Pacífico; por último Panamá presenta un foco de alta vulnerabilidad en el conocido Arco Seco, comprendidos por los municipios de la Península de Azuero.

En el caso de los municipios con bajos grados de vulnerabilidad ante sequías agrícolas, se encuentran en la costa Caribe de Nicaragua (Región Autónoma de la costa Caribe Norte) y Costa Rica (provincia de Limón y Zona norte), también los municipios más al este de Panamá en la región del Darién. De la costa del Pacífico los únicos municipios con baja vulnerabilidad corresponde a los mencionados en Panamá anteriormente y a los ubicados en la costa sur del Pacífico de Costa Rica.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

En el desarrollo de esta investigación se persiguió el objetivo de analizar los patrones espaciales de la humedad de suelo a una escala regional, integrando el contexto climático, y la cobertura de la tierra en América Central, enfocado también a encontrar diferencias entre el denominado Corredor Seco Centroamericano y las demás zonas del istmo; este objetivo general fue alcanzado integrando las conclusiones de cada objetivo específico descritas a continuación:

Objetivo 1. Procesar los datos de humedad de suelo, cobertura, precipitación y temperatura por sub-regiones y municipios.

Se realizó un procesamiento sistematizado de los conjuntos de datos por medio de programación en R y procesos realizados en SIG; la factibilidad de poder realizar estos procedimientos para el análisis de variables físicas permite tener un panorama tanto temporal como espacial del comportamiento de determinada variable que se quiera estudiar, así como identificar contrastes en ambas dimensiones por medio de la cartografía generada a partir del SIG. Entre las conclusiones puntuales de este capítulo se contempla:

- El procedimiento de conversión y promediado de los datos SMAP permitieron una representación de la humedad de suelo por estaciones en América Central en la que su distribución espacial y temporal varía considerablemente, siendo la estación menos húmeda MAM y la más húmeda SON, el rango de variaciones es amplio (0% a 70%) a lo largo del año, la diferencia entre regiones CSC y NO CSC ronda el 8% de humedad en el suelo en promedio.
- El proceso de extracción de los datos de cobertura GLC-SHARE permitió observar mayor presencia de cobertura boscosa al margen de la costa Caribe, y más presencia de cultivos y pastos en la costa del Pacífico, teniendo en cuenta que la distribución espacial de las coberturas es menos variable con respecto al tiempo.

- Espacialmente existen una mayor cantidad de municipios dentro del CSC (835) que fuera de este (362) por medio del análisis de áreas dentro de CSC y NO CSC por cada municipio.
- El uso de la herramienta estadísticas de zona permite obtener valores estadísticos de una capa ráster (variable de continuidad espacial) por medio de límites de una capa vectorial, proceso de gran utilidad al realizar pruebas y comparar unidades espaciales como los municipios, se procesaron capas ráster de humedad de suelo, coberturas vegetales, precipitación y temperatura de la superficie.

Objetivo 2. Identificar correlaciones entre la humedad del suelo y tres tipos de cobertura (bosque, pastos, cultivos) por municipio, diferencias entre regiones (CSC y NO CSC) y patrones de agrupamiento espacial.

La varianza espacial de la humedad del suelo no está determinada directamente con la variación de coberturas vegetales a escala de unidades espaciales como los municipios, dado las correlaciones no significativas, aunque también en escalas locales se observó que la cobertura no influye de gran manera en la humedad del suelo; por otro lado si se comparte la tendencia que, a mayor desarrollo de la estructura vertical y mayor densidad de la vegetación, es ligeramente mayor la retención de agua en el suelo.

Estadísticamente los municipios de las regiones CSC y NO CSC difieren en términos de humedad del suelo y cobertura, como se pudo observar en las pruebas de hipótesis, parte de esto debido a la condición geográfica/climática de cada región y a las modificaciones que históricamente el ser humano ha realizado en las coberturas.

Los patrones de distribución espacial de la humedad del suelo para cada estación climática no varían considerablemente, la tendencia de valores bajos de humedad en la vertiente del Pacífico y de valores altos en el Caribe se mantiene a lo largo del año; se considera el patrón de la estación MAM como el espacio geográfico más crítico ya que es el periodo donde más se reduce la humedad de suelo en el año.

En el caso de las coberturas vegetales también significativamente existe una diferenciación entre vertientes, la del Caribe posee los valores más significativos de cobertura forestal por lo que muchas de las zonas protegidas se encuentran en esta zona, se puede decir que gracias a estas vastas regiones protegidas quedan, aunque bastantes fragmentadas, amplias zonas de bosque; en la vertiente del Pacífico la cobertura boscosa se disminuye considerablemente, dando paso a las zonas de producción agrícola y ganadera (pastos y cultivos).

Objetivo 3. Contrastar la distribución espacial de la humedad del suelo con las características climáticas, zonas afectadas por sequías y las zonas agroproductivas de América Central.

La distribución espacial de la precipitación en periodos secos determina las zonas donde hay mayor o menor humedad del suelo tanto dentro como fuera de CSC, en los periodos de lluvias no necesariamente se presenta este fenómeno ya que el suelo está tan saturado que constantemente presenta valores altos de humedad haciendo que la correlación disminuya o sea nula, en algunos casos la evapotranspiración también puede hacer efecto dando como resultados correlaciones negativas entre la precipitación y la humedad en el suelo. La temperatura de la superficie no influye significativamente en la humedad del suelo aunque si presenta una tendencia negativa (a mayor temperatura, menor humedad del suelo y viceversa) constante dentro del CSC.

Los principales productos agrícolas para consumo interno se desarrollan en zonas con una humedad de suelo relativamente baja, aunque cada cultivo tiene periodos y requerimientos diferentes para su desarrollo, el agua es esencial en la mayoría de estos en cualquier época del año; por lo que se estima que la dependencia del riego es elevada para la producción de los granos básicos, elemento transversal en la seguridad alimentaria de la región. En el caso de los cultivos destinados a la exportación, no representan grandes extensiones de área y se distribuyen por igual entre áreas secas y húmedas; el caso del café las zonas de

producción que se encuentran en parte de humedad del suelo reducida se focalizan en El Salvador y Honduras, el resto de focos de producción se desarrollan en zonas más húmedas.

Las mayores frecuencias de sequías y sus respectivas localizaciones en América Central se han presentado en mayor parte a lo interno del patrón espacial donde la humedad de suelo es menor, alrededor del 63% de los eventos secos de la región afectaron esta zona, por lo que las condiciones secas del suelo tienden a propiciar y/o favorecer el desarrollo de los fenómenos sequía en América Central.

La integración de las variables de humedad de suelo, cobertura agrícola y frecuencia de sequías permitieron definir el porcentaje de vulnerabilidad ante sequía agrícola para todos los municipios de América Central, las zonas más críticas corresponden a una gran parte de los municipios al margen de la costa del Pacífico con valores mayores al 50%, entre los países con más cantidad de municipios en condición de alta vulnerabilidad se encuentran El Salvador y Nicaragua, en parte por su gran dependencia a las tierras de cultivo entre ellos granos básicos, y áreas que han sido afectadas históricamente por sequías meteorológicas, anudado al resultado que gran parte de su territorio presenta valores bajos de humedad en el suelo. Los municipios con menor grado de vulnerabilidad se localizan por el contrario al margen de la costa Caribe, siendo Costa Rica el país con menor exposición a la sequía agrícola por municipios, exceptuando la provincia de Guanacaste.

Conclusión general:

En la presente investigación se realizó un esfuerzo por integrar la humedad del suelo en un análisis comparativo regional, con resultados convincentes similares a varios estudios desarrollados en ámbitos climáticos y físicos ([Quesada et al., 2019](#); [Kalmarkar et al., 2011](#); [Carraño et al., 2016](#); [Chen et al., 2016](#); [Birkel, 2005](#)) y socioeconómicos ([Solano et al., 2018](#); [Gotlieb et al., 2019](#)), dando paso a incentivar el uso de las nuevas tecnologías de detección remota de humedad del suelo para integrar con estudios climáticos y sociales de la región.

Como variable espacial e influyente en los intercambios de energía la humedad del suelo forma parte del estudio y observación de los fenómenos que se desarrollan en la superficie terrestre, con el objetivo de buscar su entendimiento físico, espacial y temporal, y así encontrar formas de mejorar los modelos de vida, desarrollo socioeconómico, conservación de los ecosistemas y por supuesto evitar pérdidas humanas, económicas y ambientales por medio de la prevención.

5.2 RECOMENDACIONES

Vincular y contrastar los resultados obtenidos con proyecciones de precipitación, temperatura y evapotranspiración para estimar escenarios futuros vinculados a los escenarios de emisión de CO₂, denominados Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs por sus siglas en inglés).

Reforzar técnicas de prevención de atención a los municipios de más críticos indicados, en el contexto de eventos de sequía, así como a largo plazo diversificar y encontrar métodos de adaptación de las actividades económicas para disminuir su vulnerabilidad a la falta de recurso hídrico.

Los datos estimados de humedad de suelo de SMAP se generan cada 3 horas, por lo que es viable un monitoreo detallado de la humedad de suelo en tiempo real, se insta a que alguna institución pueda realizar este monitoreo en cada país de América Central.

Implementar la reforestación en los municipios del CSC, ya que como se observó la retención de humedad en el suelo se ve favorecida en coberturas de mayor desarrollo estructural; aunque por razones climáticas y orográficas esta región no recibe la mayor cantidad de precipitación si se puede tener una alternativa de retener por un lapso más amplio la humedad en suelo implementando técnicas como la agroforestería en la producción de pastos u otros cultivos.

El enfoque utilizado se puede aplicar para estudios más localizados o con unidades espaciales más reducidas, para obtener resultados más detallados sobre distribución de la humedad en el suelo, al igual las técnicas de interpolación espacial vinculadas con datos de índices de vegetación, temperatura y evapotranspiración pueden ayudar a llenar los vacíos espaciales por falta de datos de humedad de suelo, que en América Central son muy limitados desde el punto de vista de accesibilidad a la información.

En materia de seguridad alimentaria, como se vio muchos de los cultivos de granos básicos se encuentran en la zonas menos húmedas por lo que se debería incentivar la producción de estos en zonas donde el faltante de humedad no se una limitante o la diversificación de cultivos, dada su importancia en ámbito social de cada país, ante un gran evento seco la implicaciones para estos cultivos serian importantes, caso que ya se está presentando en los países de América Central al tener que importar granos básicos de otras regiones del mundo.

Para dar continuidad a la investigación se recomienda en un primer paso llevar a cabo la validación de los datos de humedad de suelo, ya sea en una escala local y no necesariamente regional. Se propone un flujo de trabajo de cómo se podría llevar a cabo esa validación por medio de modelamiento hidrológico y representaciones gráficas ([figura 29](#)).

En primer lugar es deseable tener una serie de datos observados robusta y completa tanto para precipitación y temperatura así como para humedad de suelo, se utilizan también datos de evapotranspiración de sensor remoto, se propone el producto **MOD16A2 Version 6 Evapotranspiration/Latent Heat Flux** de MODIS ([Running et al. 2017](#)) que posee buena resolución espacial a 500 metros por pixel, los demás datos son los utilizados en esta investigación u otros similares propuestos en el diagrama. Posteriormente se realiza un proceso de calibración y ejecución de algún modelo hidrológico existente, se proponen algunos en el diagrama, también sería recomendable usar modelos de balance hídrico

específicamente en el suelo, se propone el desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) denominado **Soil-Water-Balance model (SWB)** ([Westenbroek et al. 2010](#)). La ejecución de los modelos se realiza paralelamente, uno con datos estimados y otro con observados para realizar una comparación por funciones objetivo y gráficamente, si el resultado es robusto se procede a realizar las comparación espacial de patrones de humedad de suelo por medio de LINSa u otro método de análisis espacial por medio de SIG.

Por último como se indicó anteriormente se pueden realizar las proyecciones ejecutando nuevamente el modelo por medio de los escenarios RCPs, o con los recientemente propuestos SSPs (Shared Socio-economic Pathways) desarrollados por [Riahi et al. en 2017](#).

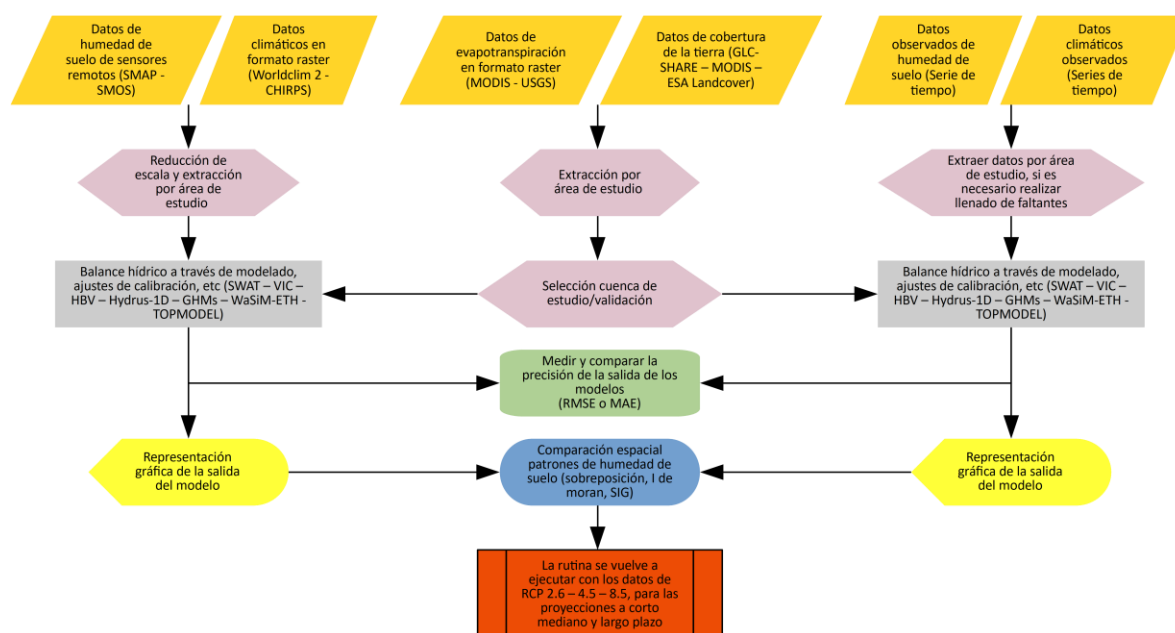


Figura 29. Diagrama de flujo con la propuesta a continuar para validación y proyecciones usando los datos de humedad de suelo, clima, cobertura y evapotranspiración.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2015). El suelo y el cambio climático, Señales – Vivir en un clima cambiante 2015. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2015/articulos/el-suelo-y-el-cambio-climatico#tab-indicadores-relacionados>
- Ahmad, S., Kalra, A., & Stephen, H. (2010). Estimating soil moisture using remote sensing data: A machine learning approach. *Advances in Water Resources*, 33(1), 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.10.008>
- Alfaro, E. J. (2014). Caracterización del “veranillo” en dos cuencas de la vertiente del Pacífico de Costa Rica, América Central. *Revista de Biología Tropical*, 62(4), 1-15. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10669/76135>
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical analysis*, 27(2), 93-115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Banco Mundial. (2017). Agricultura, valor agregado (% del PIB) - Latin America & Caribbean, Belize, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panama. Consulta disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS?end=2017&locations=ZJ-BZ-CR-SV-GT-HN-NI-PA&start=2011&type=points&view=chart>
- Benites, J., & Castellanos, A. (2003). *Mejorando la humedad del suelo con agricultura de conservación*. Centro de Investigación e Información sobre Agricultura Sostenible de bajos Insumos, Lima (Perú). Disponible en: <http://www.leisa-al.org/web/index.php/volumen-19-numero-2/2168-mejorando-la-humedad-del-suelo-con-agricultura-de-conservacion>
- Birkel, C. (2005). Sequía en Centroamérica: Implementación metodológica espacial para la cuantificación de sequías en el Golfo de Fonseca. *Revista Reflexiones*, 84(1). Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/reflexiones/article/view/11413>
- 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. Global Water Partnership. Tegucigalpa, Francisco

Morazán, Honduras: GWPC (Global Water Partnership Central America) y COSUDE (Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación), 52. Disponible en: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/patrones-de-sequia_fin.pdf

- Bonilla, C., Bonomelli, C., & Urrutia, G. (2002). Distribución espacial y temporal de la precipitación y la humedad del suelo en tres sitios forestales de la VIII región de Chile. *Agricultura Técnica*, 62(4), 541-554. <https://doi.org/10.4067/s0365-28072002000400006>
- Briassoulis, H. (2009). Factors influencing land-use and land-cover change. *Land cover, land use and the global change, encyclopaedia of life support systems (EOLSS)*, 1, 126-146. Disponible parcialmente en: <http://www.eolss.net/sample-Chapters/C19/E1-05-01-03.pdf>
- Brunsdon, C., Fotheringham, A. S., & Charlton, M. E. (1996). Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical analysis*, 28(4), 281-298. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1996.tb00936.x>
- Calvo-Solano, O., Quesada-Hernández, L., Hidalgo, H., & Gotlieb, Y. (2018). Impacts of drought in the primary sector of the Central American Dry Corridor. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 695-709. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.30828>
- Carrão, H., Naumann, G., & Barbosa, P. (2016). Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability. *Global Environmental Change*, 39, 108–124. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.04.012>
- Celemín, J. P. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación. *Revista Universitaria de Geografía*, 18, 11-31. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3832/383239099001.pdf>
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). (Sin fecha). CIRCULACIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA EN COLOMBIA. Disponible en:

<https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/01-InfoGeneralClimatCaribeCol.pdf>

- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Banco Mundial & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PUND). (1999). Climate Risk Index. Disponible en: <http://siteresources.worldbank.org/INTEEI/811099-1115809852605/20486433/ClimateRiskIndex.pdf>
- Center for Spatial Sciences, University of California, Davis. (2018). Data, World Data, GADM version 3.6. Disponible en: <https://spatial.ucdavis.edu/data/>
- Chen, C. F., Son, N. T., Chen, C. R., Chiang, S. H., Chang, L. Y., & Valdez, M. (2016). Drought monitoring in cultivated areas of Central America using multi-temporal MODIS data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 402–417. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1222313>
- Comisión Económica para América Central y el Caribe (CEPAL). 2015. Cambio climático en Centroamérica: Impactos potenciales y opciones de política pública. LC/MEX/L.1196. 178 p. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/39149-cambio-climatico-centroamerica-impactos-potenciales-opciones-politica-publica>
- European Space Agency (ESA). (2009) Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS). Disponible en: https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/SMOS/Introducing_SMO_S
- European Space Agency (ESA). (2017). ESA Climate Change Initiative - Land Cover project 2017. Disponible en: <https://esa-landcover-cci.org/>
- Estrada-Prado, W., Lescay-Batista, E., Álvarez-Fonseca, A., & Maceo-Ramos, Y. C. (2015). Niveles de humedad en el suelo sobre la producción de bulbos de cebolla. *Agronomía Mesoamericana*, 111-117. <https://doi.org/10.15517/am.v26i1.16934>
- Espíndola E, León A, Martínez R, Schejtman A. (2005). *Poverty, hunger and food security in Central America and Panama* (Vol. 88). United Nations Publications.

- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Findell, K. L. (1997). *An analysis of the relationship between soil moisture, rainfall, and boundary layer conditions, based on direct observations from Illinois* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology). Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/4407174.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2015). Los suelos en el ciclo del agua. Noticias, 2015 Año Internacional de los Suelos. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/326296/>
- Friedl, M., Sulla-Menashe, D. (2019). *MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/modis/mcd12q1.006>
- García, F. M. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Revista Ecosistemas*, 13(1). Disponible en: <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Gettelman, A., & Rood, R. B. (2016). Components of the Climate System. En *Earth Systems Data and Models* (pp. 13-22). https://doi.org/10.1007/978-3-662-48959-8_2
- Global Agricultural Monitoring (GEOGLAM). (2019). Special Report: Second consecutive year of failed yields for subsistence farmers in Central America's Dry Corridor. Special Report: october 21, 2019. Disponible en: <https://cropmonitor.org/index.php/2019/10/21/special-report-central-america-dry-corridor/>
- Global Water Parntership, Central America. (2014). Sequía en Centroamérica, hoja informativa. Disponible en: http://www.droughtmanagement.info/literature/GWPCA_InfoNote_Drought_Central_America_2014.pdf

- Gocic, M., & Trajkovic, S. (2014). Spatiotemporal characteristics of drought in Serbia. *Journal of Hydrology*, 510, 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.030>
- Goodchild, M. F. (1987). A spatial analytical perspective on geographical information systems. *International journal of geographical information system*, 1(4), 327-334. <https://doi.org/10.1080/02693798708927820>
- Gotlieb, Y., Pérez-Briceño, P. M., Hidalgo, H., & Alfaro, E. (2019). The Central American Dry Corridor: a consensus statement and its background. *Revista Mesoamericana de Biodiversidad y Cambio Climático*, 3(5), 42-51. Disponible en: <https://www.revistayuam.com/volumen-2/numero-3/notas-de-divulgacion-cientifica/the-central-american-dry-corridor-a-consensus-statement-and-its-background/>
- Greenpeace España. (2017). SEQUÍA ALGO MÁS QUE FALTA DE LLUVIA, Impactos e imágenes. Disponible en: https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2017/11/Sequia-Falta-de-Agua_WEB-1.pdf
- Hernández, B., García, B., Garrish, V., Cherrington, E., Picado, F., & Sempris, E. (2011). Mapa Centroamericano de cobertura y uso de la tierra, cambios de cobertura y uso de la tierra 1980-1990-2000-2010. CATHALAC / PREVDA. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.16349.82409>
- Hidalgo, H. G., Duran-Quesada, A. M., Amador, J. A., Alfaro, E. J., & Mora, G. (2015). Hydroclimatological Processes in the Central American Dry Corridor. *AGU Fall Meeting Abstracts*. Resumen disponible en: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015AGUFM.H41A1270H/abstract>
- Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., Amador, J. A., & Bastidas, Á. (2019). Precursors of quasi-decadal dry-spells in the Central America Dry Corridor. *Climate Dynamics* (53), 1307-1322. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04638-y>
- Imbach, P., Beardsley, M., Bouroncle, C., Medellín, C., Läderach, P., Hidalgo, H., ... & Stone, R. (2017). Climate change, ecosystems and smallholder agriculture in Central America: an introduction to the special issue. *Climatic Change*, 141(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1920-5>

- International Food Policy Research Institute. (2019). Global Spatially-Disaggregated Crop Production Statistics Data for 2010 Version 1.0 [Data set]. Harvard Dataverse. <https://doi.org/10.7910/dvn/prff8v>
- Jin, M., & Mullens, T. (2014). A study of the relations between soil moisture, soil temperatures and surface temperatures using ARM observations and offline CLM4 simulations. *Climate*, 2(4), 279-295. <https://doi.org/10.3390/cli2040279>
- Karmalkar, A. V., Bradley, R. S., & Diaz, H. F. (2011). Climate change in Central America and Mexico: regional climate model validation and climate change projections. *Climate dynamics*, 37(3-4), 605. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1099-9>
- Karnauskas, K. B., Seager, R., Giannini, A., & Busalacchi, A. J. (2013). A simple mechanism for the climatological midsummer drought along the Pacific coast of Central America. *Atmósfera*, 26(2), 261-281. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71075-0](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71075-0)
- Lakshmi, V., Jackson, T. J., & Zehrhuhs, D. (2003). Soil moisture–temperature relationships: results from two field experiments. *Hydrological processes*, 17(15), 3041-3057. <https://doi.org/10.1002/hyp.1275>
- Largaespada, K & Henríquez, C. (2015). Distribución espacial de la humedad y su relación con la textura en un suelo. *Agronomía Costarricense*, 39(3). Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/21814>
- Latham, J., Cumaní, R., Rosati, I., & Bloise, M. (2014). Global land cover share (GLC-SHARE) database beta-release version 1.0-2014. FAO: Rome, Italy. Disponible en: <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home?uuid=ba4526fd-cdbf-4028-a1bd-5a559c4bff38>
- Legates, D. R., Mahmood, R., Levia, D. F., DeLiberty, T. L., Quiring, S. M., Houser, C., & Nelson, F. E. (2010). Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 35(1), 65–86. <https://doi.org/10.1177/0309133310386514>

- Lizarazo, I. (2017). Estimación de humedad del suelo a partir de datos de sensores remotos usando bosques aleatorios. Ponencia: Séptima Semana Geomática Internacional 2017. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá, Colombia. Disponible en: https://semanageomatica.igac.gov.co/sites/semanageomatica.igac.gov.co/files/po-nencias/p_lizarazo_i_estimacion_de_humedad_del_suelo.pdf
- Li, X., Wang, Y., Li, J., & Lei, B. (2016). Physical and socioeconomic driving forces of land-use and land-cover changes: A case study of Wuhan City, China. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/8061069>
- Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12(6), 1577-1588. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)
- Martínez-González, F., Sosa-Pérez, F., & Ortiz-Medel, J. (2010). Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza. *Tecnología y ciencias del agua*, 1(4), 89-103. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222010000400005#c3
- Melgar, M., Meneses, A., Orozco, H., Pérez, O., & Espinosa, R. (eds.). (2012). El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala. CENGICANA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar). 512 p. Disponible en: <https://cengicana.org/files/20170103101309141.pdf>
- Ministerio para la Transición Ecológica, Gobierno de España. (Sin fecha). Definiciones de tipos de sequía. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/que-es-la-sequia/observatorio_nacional_sequia_1_1_tipos_sequia.aspx
- Molero, B., Merlin, O., Malbêteau, Y., Al Bitar, A., Cabot, F., Stefan, V., Jackson, T. J. (2016). SMOS disaggregated soil moisture product at 1 km resolution: Processor overview and first validation results. *Remote Sensing of Environment*, 180, 361–376. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.045>

- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2015). Soil Moisture Active Passive (SMAP). Disponible en: <https://smap.jpl.nasa.gov/>
- ORNL DAAC. (2017). Soil Moisture Visualizer. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1366>
- Pérez-Hoyos, A., Rembold, F., Kerdiles, H., & Gallego, J. (2017). Comparison of Global Land Cover Datasets for Cropland Monitoring. *Remote Sensing*, 9(11), 1118. <https://doi.org/10.3390/rs9111118>
- Petropoulos, G. P., Ireland, G., & Barrett, B. (2015). Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products & future trends. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83, 36-56. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.02.009>
- Pitts, L. (2016). Monitoring Soil Moisture for Optimal Crop Growth. Disponible en: <https://observant.zendesk.com/hc/en-us/articles/208067926-Monitoring-Soil-Moisture-for-Optimal-Crop-Growth>
- Quesada-Hernández, L. E., Calvo-Solano, O. D., Hidalgo, H. G., Pérez-Briceño, P. M., & Alfaro, E. J. (2019). Dynamical delimitation of the Central American Dry Corridor (CADC) using drought indices and aridity values. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. <https://doi.org/10.1177/0309133319860224>
- Radrián, M. (2005). Metodología de la Investigación. *Nueva Lente edición*. México.
- Ramírez, R. A., & Hernández, L. S. (2014). Aplicación de sistemas de información geográfica y técnicas de auto-correlación espacial para analizar la demanda por empleo industrial en los 81 cantones de Costa Rica en 2011. *Revista de Ciencias Económicas*, 9-38. <https://doi.org/10.15517/rce.v32i2.17250>
- Reichle, R., G. De Lannoy, R. D. Koster, W. T. Crow, J. S. Kimball, and Q. Liu. 2018. *SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 4*. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <https://doi.org/10.5067/60HB8VIP2T8W>

- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Running, S., Mu, Q., Zhao, M. (2017). MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006>
- Sánchez Sáenz, C., Menezes de Souza, Z., Eiji Matsura, E., & Salomão de Freitas, N. (2018). Efecto de la cobertura en las propiedades del suelo y en la producción de frijol irrigado. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 13(2), 41-50. Disponible en: <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/728>
- Shreve, F. (1914). Rainfall as a determinant of soil moisture. *The Plant World*, 17(1), 9-26. Disponible en: <http://www.istor.org/stable/43477038>
- Son, N. T., Chen, C. F., Chen, C. R., Castellón, A., Masferrer, M. G. M., & Recinos, L. E. M. (2018). Satellite characterization of drought over cultivated areas in Central America. *International journal of remote sensing*, 39(23), 8505-8526. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1488287>
- Soria, J. (1976). Los sistemas de agricultura en el Istmo Centroamericano. *Revista de Biología Tropical*, 57-68. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/25916>
- Stads, G. J. Hartwich, F. Rodriguez, D & Enciso, F. (2008). I&D agropecuaria en América Central: Políticas, inversiones y perfil institucional. Informe Regional ASTI. Instituto Internacional de Investigación en Políticas Alimentarias e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Disponible en: <https://www.asti.cgiar.org/pdf/ASTICentralAmerica-Sp.pdf>
- Tobler, W. R. (1979). Cellular Geography. *Philosophy in Geography* (pp. 379-386). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-9394-5_18

- Van der Zee, A., van der Zee, J., Meyrat, A., Poveda, C., & Picado, L. (2012). Estudio de la caracterización del Corredor Seco Centroamericano. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 92 p. Disponible en: https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/tomo_i_corredor_seco.pdf
- Vaqué, J. (2017). Cronología del Corredor Seco: El acelerador de la resiliencia en Centroamérica. Agronoticias: Actualidad agropecuaria de América Latina y el Caribe. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Disponible en: <http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/1024540/>
- Vargas-Ulate, G. (2001). Las lluvias en América Central: una climatología geográfica. *Anuario de Estudios Centroamericanos*, 7-19. Diponible en: <https://www.istor.org/stable/25661347>
- Wang, L., Qu, J. J., Zhang, S., Hao, X., & Dasgupta, S. (2007). Soil moisture estimation using MODIS and ground measurements in eastern China. *International Journal of Remote Sensing*, 28(6), 1413–1418. <https://doi.org/10.1080/01431160601075525>
- Westenbroek, S. M., Kelson, V. A., Dripps, W. R., Hunt, R. J., & Bradbury, K. R. (2010). SWB-A modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance code for estimating groundwater recharge. Techniques and Methods. US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/tm6a31>
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111–120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>
- Yang, L., Sun, G., Zhi, L., & Zhao, J. (2018). Negative soil moisture-precipitation feedback in dry and wet regions. *Scientific reports*, 8(1), 4026. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22394-7>

ANEXOS

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Script R, descarga de datos de humedad de suelo SMAP. _____	93
Anexo 2: Script R, Generar promedios mensuales de humedad de suelo SMAP. _____	93
Anexo 3: Script R, compilación de procesos objetivo 1. _____	94
Anexo 4: Listado de municipios clasificados como urbanos y excluidos del análisis. _____	97
Anexo 5: Script R, compilación de procesos objetivo 2. _____	97
Anexo 6: Script R, compilación de procesos objetivo 3. _____	102
Anexo 7: Municipios clasificados como parte del CSC, con su porcentaje de área correspondiente. _____	105
Anexo 8: Distribución de frecuencias, porcentaje promedio mensual de humedad de suelo en municipios por región. _____	110

Anexo 1: Script R, descarga de datos de humedad de suelo SMAP.

```
# Universidad de Costa Rica, Taller especializado en SIG y Teledetección, II Ciclo 2018
# Estudiante: Jorge Daniel García Girón, Carné: B12703
# Rutina para la obtención, transformación y reproyección de los productos SMAP Soil Moisture de
# resolución 9 x 9 Kilómetros.

# Paquetes requeridos SMAPR (exclusivo para datos de SMAP) para obtención y descarga de datos
# y RASTER para la transformación y reproyección.
require('smapr')
require('raster')

# Insertar credenciales en repositorio de datos NASA EarthData.
Sys.setenv(ed_un = 'usuario', ed_pw = 'contraseña')

# Búsqueda de producto por categoría, fecha, versión.
start_date <- as.Date("2018-06-28")
end_date <- as.Date("2018-06-30")
date_sequence <- seq(start_date, end_date, by = 1)
available_data <- find_smmap(id = "SPL4SMAU", dates = date_sequence, version = 4)

# Descripción de producto encontrado.
str(available_data)

# Descarga de producto encontrado.
local_files <- download_smmap(available_data, "C:/SM", overwrite = FALSE, verbose = FALSE)

# Descripción del producto descargado.
str(local_files)

# Lista de repositorio de información almacenada en el producto .h5 descargado.
list_smmap(local_files[1, ])

# Con el tipo de dato requerido identificado se procede a extraerlo del repositorio .h5 para
# asignarlo a un objeto R.
sm_raster <- extract_smmap(local_files, '/Analysis_Data/sm_rootzone_analysis')

# Recorte de área de estudio según vectorial de América Central (cuadrante).
AC <- shapefile("F:/AC_adm0.shp")
proj_ac_extent <- spTransform(AC, crs(sm_raster))
ac_soil_moisture <- crop(sm_raster, proj_ac_extent)

# Se calcula el valor promedio para los 15 días.
mean_sm <- calc(ac_soil_moisture_m, fun = mean)

# Se visualiza el producto extraído.
plot(mean_sm)

# Se transforma esta capa en un archivo ráster de formato GEOTIFF.
writeRaster(mean_sm, "F:/Prueba/9K/nombre_archivo_de_salida.tif", NAflag = -9999, overwrite = T)

# Fin de rutina.
```

Anexo 2: Script R, Generar promedios mensuales de humedad de suelo SMAP.

```
# Universidad de Costa Rica, Taller especializado en SIG y Teledetección, I Ciclo 2019
# Estudiante: Jorge Daniel García Girón, Carné: B12703
# Rutina para promediar datos de humedad de suelo SMAP descargados (15 días) a mensuales.

# Librería necesaria "raster".
require(raster)

# Ruta datos de humedad del suelo cada 15 días.
setwd("H:/MAESTRÍA/TESIGT II/Soil_Moisture_SMAP_DATA")

# Función para llevar a cabo los promedios mensuales y la escritura de archivos formato GeoTIFF.
mean.month <- function(año, mes){
  setwd(paste("H:/MAESTRÍA/TESIGT II/Soil_Moisture_SMAP_DATA", año, mes, sep = "/"))
  sm_15 <- list.files(pattern = ".tif")
  sm_15 <- stack(sm_15)
  sm_15 <- calc(sm_15, fun = mean)
  return(writeRaster(sm_15,
    paste(c("H:/MAESTRÍA/TESIGT II/Soil_Moisture_SMAP_DATA/promedio_mensual/"),
      substr(mes, 1, 2), "_", año, sep = ""), format = "GTiff",
      NAflag = -9999, overwrite = F))
}

# 2015.
mean.month("2015", "04_abril");
mean.month("2015", "05_mayo"); mean.month("2015", "06_junio");
mean.month("2015", "07_julio"); mean.month("2015", "08_agosto");
mean.month("2015", "09_septiembre"); mean.month("2015", "10_octubre");
mean.month("2015", "11_noviembre"); mean.month("2015", "12_diciembre")

# 2016.
mean.month("2016", "01_enero"); mean.month("2016", "02_febrero");
mean.month("2016", "03_marzo"); mean.month("2016", "04_abril");
```

```

mean.month("2016", "05_mayo"); mean.month("2016", "06_junio");
mean.month("2016", "07_julio"); mean.month("2016", "08_agosto");
mean.month("2016", "09_septiembre"); mean.month("2016", "10_octubre");
mean.month("2016", "11_noviembre"); mean.month("2016", "12_diciembre")

# 2017.
mean.month("2017", "01_enero"); mean.month("2017", "02_febrero");
mean.month("2017", "03_marzo"); mean.month("2017", "04_abril");
mean.month("2017", "05_mayo"); mean.month("2017", "06_junio");
mean.month("2017", "07_julio"); mean.month("2017", "08_agosto");
mean.month("2017", "09_septiembre"); mean.month("2017", "10_octubre");
mean.month("2017", "11_noviembre"); mean.month("2017", "12_diciembre")

# 2018.
mean.month("2018", "01_enero"); mean.month("2018", "02_febrero");
mean.month("2018", "03_marzo"); mean.month("2018", "04_abril");
mean.month("2018", "05_mayo"); mean.month("2018", "06_junio");
mean.month("2018", "07_julio"); mean.month("2018", "08_agosto");
mean.month("2018", "09_septiembre"); mean.month("2018", "10_octubre");
mean.month("2018", "11_noviembre"); mean.month("2018", "12_diciembre")

# 2019.
mean.month("2019", "01_enero"); mean.month("2019", "02_febrero");
mean.month("2019", "03_marzo"); mean.month("2019", "04_abril");
mean.month("2019", "05_mayo"); mean.month("2019", "06_junio");
mean.month("2019", "07_julio")

# Fin de rutina.

```

Anexo 3: Script R, compilación de procesos objetivo 1.

```

# Universidad de Costa Rica, Taller especializado en SIG y Teledetección, I Ciclo 2019
# Estudiante: Jorge Daniel García Girón, Carné: B12703
# Rutina para procesar los datos recopilados de sensores remotos (objetivo I).

# Librerías "raster" y "rgdal" necesaria para procesar datos GeoTIFF.
require(raster)
require(rgdal)

# Ruta de datos de humedad de suelo por mes (cambiar raíz en caso necesario).
setwd("H:/MAESTRÍA/TESIGT II/Soil_Moisture_SMAP_DATA/promedio_mensual")

# Remuestreo (resample) de Humedad de suelo y archivos TIFF Y SHP. -----
# Función para promediado por mes de toda la serie temporal.
month_mean <- function(v1) {
  fun_sm <- list.files(pattern = v1)
  sm_stack <- stack(fun_sm)
  me_sm <- calc(sm_stack, fun = mean)
  return(me_sm)}

# Promedios mensuales de tiempo humedad de suelo.
enero <- month_mean("^01_")
febrero <- month_mean("^02_")
marzo <- month_mean("^03_")
abril <- month_mean("^04_")
mayo <- month_mean("^05_")
junio <- month_mean("^06_")
julio <- month_mean("^07_")
agosto <- month_mean("^08_")
septiembre <- month_mean("^09_")
octubre <- month_mean("^10_")
noviembre <- month_mean("^11_")
diciembre <- month_mean("^12_")

# Estaciones del hemisferio norte y promedio por estación.
def <- brick(diciembre, enero, febrero)
mam <- brick(marzo, abril, mayo)
jja <- brick(junio, julio, agosto)
son <- brick(septiembre, octubre, noviembre)

def <- calc(def, fun = mean)
mam <- calc(mam, fun = mean)
jja <- calc(jja, fun = mean)
son <- calc(son, fun = mean)

# Reproyección de objeto ráster para estandarizar referencia espacial (EPSG:4326).
def <- projectRaster(def, crs = "+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs")
mam <- projectRaster(mam, crs = "+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs")
jja <- projectRaster(jja, crs = "+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs")
son <- projectRaster(son, crs = "+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs")

# Reducción de escala a 1km utilizando de referencia una capa ráster de esta resolución.
swc <- raster("H:/MAESTRÍA/TESIGT II/Average_data/swc_mean.tif")

def <- resample(def, swc, method = "bilinear")
mam <- resample(mam, swc, method = "bilinear")
jja <- resample(jja, swc, method = "bilinear")

```

```

son <- resample(son, swc, method = "bilinear")

# Recorte o máscara para América Central.
AC <- shapefile("H:/MAESTRÍA/TESIGT III/AC_NOT_BELIZE/AC_WB_NB.shp")

def <- mask(def, AC)
mam <- mask(mam, AC)
jja <- mask(jja, AC)
son <- mask(son, AC)

# Vectorización de las capas con reducción de escala para autocorrelación espacial.
def_v <- rasterToPolygons(def)
mam_v <- rasterToPolygons(mam)
jja_v <- rasterToPolygons(jja)
son_v <- rasterToPolygons(son)

def_v@data$Percen_SM <- round(def_v@data$layer * 100, 2)
mam_v@data$Percen_SM <- round(mam_v@data$layer * 100, 2)
jja_v@data$Percen_SM <- round(jja_v@data$layer * 100, 2)
son_v@data$Percen_SM <- round(son_v@data$layer * 100, 2)

# Escritura de producto vectorizado para ejecutar en software GeoDa.
shapefile(def_v, "H:/MAESTRÍA/TESIGT III/Datos_Objetoivo_1/Estaciones_SM/def.shp",
  overwrite = T)
shapefile(mam_v, "H:/MAESTRÍA/TESIGT III/Datos_Objetoivo_1/Estaciones_SM/mam.shp",
  overwrite = T)
shapefile(jja_v, "H:/MAESTRÍA/TESIGT III/Datos_Objetoivo_1/Estaciones_SM/jja.shp",
  overwrite = T)
shapefile(son_v, "H:/MAESTRÍA/TESIGT III/Datos_Objetoivo_1/Estaciones_SM/son.shp",
  overwrite = T)

# Vectorización de coberturas GCL-FAO, llamado de datos GeoTIFF. -----
crop <- raster("H:/MAESTRÍA/TESIGT II/Average_data/glc_fao_02.tif")
grass <- raster("H:/MAESTRÍA/TESIGT II/Average_data/glc_fao_03.tif")
forest <- raster("H:/MAESTRÍA/TESIGT II/Average_data/glc_fao_04.tif")

# Recorte o máscara.
crop_ac <- mask(crop, AC)
grass_ac <- mask(grass, AC)
forest_ac <- mask(forest, AC)

# Vectorización de coberturas.
crop_v <- rasterToPolygons(crop_ac)
grass_v <- rasterToPolygons(grass_ac)
forest_v <- rasterToPolygons(forest_ac)

# Escritura de producto vectorizado para ejecutar en software GeoDa.
shapefile(crop_v, "H:/MAESTRÍA/TESIGT III/Datos_Objetoivo_1/Coberturas/Pixel/crop.shp")
shapefile(grass_v, "H:/MAESTRÍA/TESIGT III/Datos_Objetoivo_1/Coberturas/Pixel/grass.shp")
shapefile(forest_v, "H:/MAESTRÍA/TESIGT III/Datos_Objetoivo_1/Coberturas/Pixel/forest.shp")

# Estadísticas de zona para extraer valores promedio de humedad de suelo,
# temperatura, precipitación y cobertura. -----

# Proceso de reproyección y remuestreo de datos de humedad a 9Km mensuales para obtener GeoTIFF de
# 1k con proyección geográfica WGS 1984-EPSS:4326.

# Unión de meses de serie temporal en un rasterbrick.
ac_brick <- brick(enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto,
  septiembre, octubre, noviembre, diciembre)

# Nombrar los meses en orden de calendario.
meses <- c("01_enero", "02_febrero", "03_marzo", "04_abril", "05_mayo", "06_junio",
  "07_julio", "08_agosto", "09_septiembre", "10_octubre", "11_noviembre",
  "12_diciembre")

# Nombrar cada ráster según mes correspondiente.
names(ac_brick) <- meses

# Función de remuestreo o reducción de escala (9km a 1km) para cada mes.
month_ras <- function(v1, v2){
  setwd("H:/MAESTRÍA/TESIGT III/Datos_Objetoivo_1/Meses_SM/Raster")
  sm_ac <- projectRaster(v1, crs = "+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs")
  sm_1k <- resample(sm_ac, v2, method = "bilinear")
  writeRaster(sm_1k, filename = names(sm_1k), bylayer = T, format = "GTiff",
    overwrite = T)}

# Ejecución de la función y escritura de los archivos GeoTIFF para proceso de estadísticas de zona
# en QGIS 3, el mismo procedimiento realizado para coberturas y variables climáticas.
month_ras(ac_brick, swc)

# Limpiar objetos del entorno de trabajo.
rm(list = ls())

# Unión tablas de variables con etiquetas de municipios dentro y fuera de CSC (>35%). ----
setwd("H:/MAESTRÍA/TESIGT III/Datos_Objetoivo_1")

# Tablas totales y diferenciadas por región.

```

```

preci <- read.csv("Climáticas/Tablas/preci_muni.csv", header = T, encoding = "UTF-8")
temp <- read.csv("Climáticas/Tablas/temp_muni.csv", header = T, encoding = "UTF-8")
swc <- read.csv("Climáticas/Tablas/swc_muni.csv", header = T, encoding = "UTF-8")
cover <- read.csv("Coberturas/Tablas/cover_muni.csv", header = T, encoding = "UTF-8")
sm <- read.csv("Meses_SM/Tablas/sm_muni.csv", header = T, encoding = "UTF-8")
muni_csc <- read.csv("Municipios_CSC/csc_muni.csv", header = T, encoding = "UTF-8")
urban_csc <- read.csv("Municipios_Urbanos/urban_muni.csv", header = T, encoding = "UTF-8")

# Nombres de encabezados para humedad del suelo procesados desde QGIS 3.
names(sm) <- c("NAME_0", "NAME_1", "NAME_2", "COD", "ene_sm", "feb_sm", "mar_sm", "abr_sm",
  "may_sm", "jun_sm", "jul_sm", "ago_sm", "sep_sm", "oct_sm", "nov_sm", "dic_sm")

# Eliminar municipios con cubiertas artificiales mayores al 15% promedio de las tablas de variables
# anteriormente procesados en QGIS 3 con cálculo de áreas.
# Creación de campo urbano en las tablas de datos.
sm$URBAN <- urban_csc$urban
cover$URBAN <- urban_csc$urban
temp$URBAN <- urban_csc$urban
preci$URBAN <- urban_csc$urban
swc$URBAN <- urban_csc$urban
muni_csc$URBAN <- urban_csc$urban

# Extracción de municipios.
sm <- subset(sm, URBAN == 0)
cover <- subset(cover, URBAN == 0)
temp <- subset(temp, URBAN == 0)
preci <- subset(preci, URBAN == 0)
swc <- subset(swc, URBAN == 0)
muni_csc <- subset(muni_csc, URBAN == 0)

# Creación de campo de etiqueta dentro o fuera de CSC para cada municipio.
sm$CSC <- muni_csc$CSC
cover$CSC <- muni_csc$CSC
temp$CSC <- muni_csc$CSC
preci$CSC <- muni_csc$CSC

# Extracción de tablas con municipios CSC y NO-CSC para diferenciación estadística
# (cobertura y humedad de suelo).
sm_csc <- subset(sm, CSC == 1); sm_csc$mean <- rowMeans(sm_csc[, 5:16])
sm_no_csc <- subset(sm, CSC == 0); sm_no_csc$mean <- rowMeans(sm_no_csc[, 5:16])

cover_csc <- subset(cover, CSC == 1)
cover_no_csc <- subset(cover, CSC == 0)

# Tablas de variables unificadas para correlaciones por mes.
ene_df <- cover[, c(3:7, 9)]
ene_df$ene_sm <- sm$ene_sm
ene_df$ene_preci <- preci$ene_preci
ene_df$ene_temp <- temp$ene_temp

feb_df <- cover[, c(3:7, 9)]
feb_df$feb_sm <- sm$feb_sm
feb_df$feb_preci <- preci$feb_preci
feb_df$feb_temp <- temp$feb_temp

mar_df <- cover[, c(3:7, 9)]
mar_df$mar_sm <- sm$mar_sm
mar_df$mar_preci <- preci$mar_preci
mar_df$mar_temp <- temp$mar_temp

abr_df <- cover[, c(3:7, 9)]
abr_df$abr_sm <- sm$abr_sm
abr_df$abr_preci <- preci$abr_preci
abr_df$abr_temp <- temp$abr_temp

may_df <- cover[, c(3:7, 9)]
may_df$may_sm <- sm$may_sm
may_df$may_preci <- preci$may_preci
may_df$may_temp <- temp$may_temp

jun_df <- cover[, c(3:7, 9)]
jun_df$jun_sm <- sm$jun_sm
jun_df$jun_preci <- preci$jun_preci
jun_df$jun_temp <- temp$jun_temp

jul_df <- cover[, c(3:7, 9)]
jul_df$jul_sm <- sm$jul_sm
jul_df$jul_preci <- preci$jul_preci
jul_df$jul_temp <- temp$jul_temp

ago_df <- cover[, c(3:7, 9)]
ago_df$ago_sm <- sm$ago_sm
ago_df$ago_preci <- preci$ago_preci
ago_df$ago_temp <- temp$ago_temp

sep_df <- cover[, c(3:7, 9)]
sep_df$sep_sm <- sm$sep_sm
sep_df$sep_preci <- preci$sep_preci

```

```

sep_df$sep_temp <- temp$sep_temp

oct_df <- cover[, c(3:7, 9)]
oct_df$oct_sm <- sm$oct_sm
oct_df$oct_preci <- preci$oct_preci
oct_df$oct_temp <- temp$oct_temp

nov_df <- cover[, c(3:7, 9)]
nov_df$nov_sm <- sm$nov_sm
nov_df$nov_preci <- preci$nov_preci
nov_df$nov_temp <- temp$nov_temp

dic_df <- cover[, c(3:7, 9)]
dic_df$dic_sm <- sm$dic_sm
dic_df$dic_preci <- preci$dic_preci
dic_df$dic_temp <- temp$dic_temp

# Eliminar datos de municipios urbanos y etiqueta de CSC, NO-CSC.
rm(urban_csc, muni_csc)

# Fin de rutina.

```

Anexo 4: Listado de municipios clasificados como urbanos y excluidos del análisis.

Código	País	Departamento/Provincia	Municipio/Cantón	% de cobertura urbana promedio
73	El Salvador	Cuscatlán	Santa Cruz Michapa	22,9
76	El Salvador	La Libertad	Antiguo Cuscatlán	27,1
185	El Salvador	San Salvador	Ayutuxtepeque	52,1
191	El Salvador	San Salvador	Mejicanos	70,0
197	El Salvador	San Salvador	San Salvador	45,8
328	Panamá	Panamá	San Miguelito	47,1
845	Guatemala	Guatemala	Mixco	60,6
856	Guatemala	Guatemala	Villa Nueva	15,3
857	Guatemala	Guatemala	ZONA 10	32,1
858	Guatemala	Guatemala	ZONA 11	99,4
859	Guatemala	Guatemala	ZONA 12	70,5
860	Guatemala	Guatemala	ZONA 13	82,0
861	Guatemala	Guatemala	ZONA 14	47,6
866	Guatemala	Guatemala	ZONA 19	90,9
867	Guatemala	Guatemala	ZONA 1	50,0
871	Guatemala	Guatemala	ZONA 2	39,1
872	Guatemala	Guatemala	ZONA 3	100,0
873	Guatemala	Guatemala	ZONA 4	45,5
876	Guatemala	Guatemala	ZONA 7	93,4
877	Guatemala	Guatemala	ZONA 8	93,4
878	Guatemala	Guatemala	ZONA 9	91,7
1019	Guatemala	Sacatepéquez	Santiago Sacatepéquez	17,4
1197	Costa Rica	San José	San José	19,9
1200	Costa Rica	San José	Tibás	19,0

Anexo 5: Script R, compilación de procesos objetivo 2.

```

# Universidad de Costa Rica, Taller especializado en SIG y Teledetección, I Ciclo 2019
# Estudiante: Jorge Daniel García Girón, Carné: B12703
# Rutina para la aplicación de correlaciones espaciales entre porcentaje de
# cobertura (GLC FAO) y datos de humedad de suelo (SMAP), pruebas de significancia estadística
# y su respectiva representación gráfica (objetivo II).

# Librerías necesaria para procesar datos.
require(ggplot2)
require(reshape2)
require(plyr)

# Correlación Humedad de suelo coberturas (cálculos y gráficos). -----

# Creación de función t.corr la cual extraerá los valores de correlación de Pearson
# entre las variables de humedad de suelo y coberturas por mes, para graficar.
t.corr <- function(v1){
  csc <- subset(v1, CSC == 1)
  n.csc <- subset(v1, CSC == 0)
  c.csc <- data.frame(cor(csc[, c(3:5, 7)]))
  c.n.csc <- data.frame(cor(n.csc[, c(3:5, 7)]))
  c.csc <- data.frame(c.csc[-4, 4])
  c.csc$cor_ncsc <- c.n.csc[-4, 4]
  colnames(c.csc) <- c("cor_csc", "cor_ncsc")
  c.csc$cover <- c("cultivos", "pastos", "bosques")
  cor.t <- t(c.csc)
  colnames(cor.t) <- cor.t[3,]
  cor.t <- data.frame(cor.t[-3,])
  cor.t$csc <- c("CSC", "NO CSC")
  cor.t$month <- deparse(substitute(v1))
  return(cor.t)}

# Tablas de correlaciones por mes (df de objetivo 1 scrip).

```

```

ene <- t.corr(ene_df); ene$month <- "enero"
feb <- t.corr(feb_df); feb$month <- "febrero"
mar <- t.corr(mar_df); mar$month <- "marzo"
abr <- t.corr(abr_df); abr$month <- "abril"
may <- t.corr(may_df); may$month <- "mayo"
jun <- t.corr(jun_df); jun$month <- "junio"
jul <- t.corr(jul_df); jul$month <- "julio"
ago <- t.corr(ago_df); ago$month <- "agosto"
sep <- t.corr(sep_df); sep$month <- "septiembre"
oct <- t.corr(oct_df); oct$month <- "octubre"
nov <- t.corr(nov_df); nov$month <- "noviembre"
dic <- t.corr(dic_df); dic$month <- "diciembre"

# Unificar las tablas mensuales con todos los valores de correlación.
month_cor <- rbind(ene, feb, mar, abr, may, jun, jul, ago, sep, oct, nov, dic)
month_cor$id <- seq.int(nrow(month_cor))

# Eliminar las tablas generales de las variables mensuales.
rm(list = ls(pattern = "f$"))

# Gráficos de resultados de correlaciones por mes.
# Referencia principal para gráficas: https://rpubs.com/Koundy/71792

# Tabulación de variables para representación gráfica con GGLOT2.
t.cor.t <- melt(month_cor, id = "id")
t.csc <- subset(t.cor.t, variable == "csc")
t.month <- t.cor.t[97:120, ]
t.final <- t.cor.t[1:72, ]
t.final <- merge(t.final, t.csc, by = "id")
t.final <- merge(t.final, t.month, by = "id")
t.final <- t.final[, -c(4, 6)]
names(t.final) <- c("id", "cover", "correlation", "csc", "month")
t.final$correlation <- as.numeric(t.final$correlation)
t.final$csc <- factor(t.final$csc)
nivel <- c("enero", "febrero", "marzo", "abril", "mayo", "junio", "julio",
          "agosto", "septiembre", "octubre", "noviembre", "diciembre")
nivel2 <- c("bosques", "cultivos", "pastos")
t.final$cover <- factor(t.final$cover, levels = nivel2)
t.final$month <- factor(t.final$month, levels = nivel)

# Gráfico base de correlaciones por mes.
plot.cor <- ggplot(data = t.final, aes(x = csc, y = correlation)) +
  geom_bar(position="dodge", stat = "identity", aes(fill = cover)) +
  scale_fill_manual(values = c("#006400", "#DCFC64", "#FFB432")) +
  facet_wrap(~ month) +
  geom_hline(yintercept = 0) +
  ylab("Coeficiente de correlación de Pearson") +
  xlab("Región") +
  guides(fill = guide_legend(title="Cobertura:"))

# Función para gráficos mejorados para publicaciones científicas (Gráfico correlación
# humedad de suelo y cobertura).
theme_Publication <- function(base_size=14, base_family="helvetica") {
  library(grid)
  library(ggthemes)
  (theme_foundation(base_size=base_size, base_family=base_family)
  + theme(plot.title = element_text(face = "bold",
    size = rel(1.2), hjust = 0.5),
    text = element_text(),
    panel.background = element_rect(colour = NA),
    plot.background = element_rect(colour = NA),
    panel.border = element_rect(colour = "black"),
    axis.title = element_text(face = "bold", size = rel(0.8)),
    axis.title.y = element_text(angle=90, vjust = 2),
    axis.title.x = element_text(vjust = -0.2),
    axis.text = element_text(),
    axis.line = element_line(colour="black"),
    axis.ticks = element_line(),
    panel.grid.major = element_line(colour="#DCDCDC"),
    panel.grid.minor = element_blank(),
    legend.key = element_rect(colour = NA),
    legend.position = "bottom",
    legend.direction = "horizontal",
    legend.key.size = unit(0.5, "cm"),
    legend.margin = unit(0, "cm"),
    legend.text = element_text(face = "italic", size = rel(0.8)),
    legend.title = element_text(face="bold.italic", size = rel(0.8)),
    plot.margin=unit(c(5,5,5,5),"mm"),
    strip.background=element_rect(colour="black",fill="#DCDCDC"),
    strip.text = element_text(face = "italic"))))

# Representación final correlaciones humedad de suelo y cobertura (Figura X).
plot.cor + theme_Publication()

# Pruebas de significancia y diferenciación estadística. -----

# Eliminar notación científica.
options(scipen = 999)

```

```

# Pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk):
# https://rpubs.com/RubenOrtiz/192363
# https://studio-pubs-static.s3.amazonaws.com/104218\_08db61b0ad4a496baad649b95ec457ee.html

# Calculo de prueba de hipótesis (distribución normal).
t.shapiro <- function(v1, v2){
  csc <- shapiro.test(v1)
  no_csc <- shapiro.test(v2)
  return(rbind(csc, no_csc))
}

# Cobertura Shapiro-Wilk.
t.shapiro(cover_csc$forest, cover_no_csc$forest)
t.shapiro(cover_csc$grass, cover_no_csc$grass)
t.shapiro(cover_csc$crop, cover_no_csc$crop)

# Humedad del suelo Shapiro-Wilk.
t.shapiro(sm_csc$mean, sm_no_csc$mean)

# Plot de distribución datos de cobertura. -----
# Tabulación, nombres, tipos de datos y etiquetas de la tabla de coberturas.
cover.df <- cover
cover.df$CSC[cover.df$CSC==1] = "CSC"
cover.df$CSC[cover.df$CSC==0] = "NO CSC"
cover.df <- cover.df[, -c(1:3)]
cover.df <- cover.df[, -5]
names(cover.df) <- c("COD", "cultivos", "pastos", "bosque", "CSC")
cover.df <- melt(cover.df, id.vars = "COD")
csc.df <- subset(cover.df, variable == "CSC")
cover.df <- cover.df[-c(3520:4692),]
tabla.cover <- merge(cover.df, csc.df, by = "COD")
tabla.cover <- tabla.cover[, -4]
names(tabla.cover) <- c("COD", "COVER", "PERCEN", "CSC")
tabla.cover$COVER <- factor(tabla.cover$COVER)
tabla.cover$PERCEN <- as.numeric(tabla.cover$PERCEN)
tabla.cover$CSC <- factor(tabla.cover$CSC)
rm(cover.df, csc.df)

# Cálculo de media para cada cobertura y región.
mean.cover <- ddply(tabla.cover, c("CSC", "COVER"), summarise, cover.grp.mean = mean(PERCEN))
head(mean.cover)

# Función para gráficos mejorados para publicaciones científicas (Gráfico distribución coberturas).
theme_Publication <- function(base_size=14, base_family="helvetica") {
  library(grid)
  library(ggthemes)
  (theme_foundation(base_size=base_size, base_family=base_family)
  + theme(plot.title = element_text(face = "bold",
    size = rel(1), hjust = 0.5),
    text = element_text(),
    panel.background = element_rect(colour = NA),
    plot.background = element_rect(colour = NA),
    panel.border = element_rect(colour = "black"),
    axis.title = element_text(face = "bold", size = rel(0.8)),
    axis.title.y = element_text(angle=90, vjust = 2),
    axis.title.x = element_text(vjust = -0.2),
    axis.text = element_text(),
    axis.line = element_line(colour="black"),
    axis.ticks = element_line(),
    panel.grid.major = element_line(colour="#DCDCDC"),
    panel.grid.minor = element_blank(),
    legend.key = element_rect(colour = NA),
    legend.position = "bottom",
    legend.direction = "horizontal",
    legend.key.size = unit(0.5, "cm"),
    legend.margin = unit(0, "cm"),
    legend.text = element_text(face = "italic", size = rel(0.8)),
    legend.title = element_text(face="bold.italic", size = rel(0.8)),
    plot.margin=unit(c(5,5,5,5),"mm"),
    strip.background=element_rect(colour="black",fill="#DCDCDC"),
    strip.text = element_text(face="italic"),
    strip.text.y = element_blank()))

# Gráfico base de distribución de coberturas.
cover.dist.plot <- ggplot(tabla.cover, aes(x = PERCEN, fill = COVER)) +
  geom_histogram(binwidth = 1) +
  geom_density(aes(y = ..count..), alpha = 0.5) +
  facet_grid(COVER ~ CSC, scales = "free", as.table = T) +
  scale_fill_manual(values = c("#DCF064", "#FFB432", "#006400")) +
  geom_vline(data = mean.cover, aes(xintercept = cover.grp.mean),
  linetype = "dashed", size = .5, color = "red") +
  xlab("Porcentaje (%)") + ylab("Cantidad de municipios") +
  guides(fill = guide_legend(title="Cobertura:"))

# Representación final distribución de coberturas (Figura X).
cover.dist.plot + theme_Publication()

# Eliminar gráfico y tabla base.

```

```

rm(cover.dist.plot, mean.cover)

# Plot de distribuciones humedad de suelo (ESTACIONES). -----
# Tabulación, nombres, tipos de datos y etiquetas de la tabla de humedad de suelo.
def.sm.df <- sm[, c(4, 16, 5:6, 18)]
mam.sm.df <- sm[, c(4, 7:9, 18)]
jja.sm.df <- sm[, c(4, 10:12, 18)]
son.sm.df <- sm[, c(4, 13:15, 18)]
def.sm.df$CSC[def.sm.df$CSC==1] = "CSC"
mam.sm.df$CSC[mam.sm.df$CSC==1] = "CSC"
jja.sm.df$CSC[jja.sm.df$CSC==1] = "CSC"
son.sm.df$CSC[son.sm.df$CSC==1] = "CSC"
def.sm.df$CSC[def.sm.df$CSC==0] = "NO CSC"
mam.sm.df$CSC[mam.sm.df$CSC==0] = "NO CSC"
jja.sm.df$CSC[jja.sm.df$CSC==0] = "NO CSC"
son.sm.df$CSC[son.sm.df$CSC==0] = "NO CSC"
def.sm.df$def <- rowMeans(def.sm.df[, 2:4])
mam.sm.df$mam <- rowMeans(mam.sm.df[, 2:4])
jja.sm.df$jja <- rowMeans(jja.sm.df[, 2:4])
son.sm.df$son <- rowMeans(son.sm.df[, 2:4])
seasonal.sm.df <- def.sm.df[, c(2:4)]
seasonal.sm.df$mam <- mam.sm.df$mam
seasonal.sm.df$jja <- jja.sm.df$jja
seasonal.sm.df$son <- son.sm.df$son
seasonal.sm.df <- melt(seasonal.sm.df, id.vars = "COD")
seasonal.csc.df <- subset(seasonal.sm.df, variable == "CSC")
seasonal.sm.df <- seasonal.sm.df[-c(1:1173),]
seasonal.tabla.sm <- merge(seasonal.sm.df, seasonal.csc.df, by = "COD")
seasonal.tabla.sm <- seasonal.tabla.sm[, -4]
names(seasonal.tabla.sm) <- c("COD", "SEASON", "MEAN", "CSC")
seasonal.tabla.sm$SEASON <- factor(seasonal.tabla.sm$SEASON)
seasonal.tabla.sm$MEAN <- as.numeric(seasonal.tabla.sm$MEAN)
seasonal.tabla.sm$CSC <- factor(seasonal.tabla.sm$CSC)
seasonal.tabla.sm$PERCEN <- seasonal.tabla.sm$MEAN * 100
rm(seasonal.sm.df, seasonal.csc.df, def.sm.df, mam.sm.df, jja.sm.df, son.sm.df)

# Cálculo de media para cada estación y región.
seasonal.mean.sm <- ddply(seasonal.tabla.sm, c("CSC", "SEASON"), summarise,
  sm.grp.mean = mean(PERCEN))
head(seasonal.mean.sm)

# Función para gráficos mejorados para publicaciones científicas (Gráfico distribución humedad de suelo).
theme_Publication <- function(base_size=14, base_family="helvetica") {
  library(grid)
  library(ggthemes)
  (theme_foundation(base_size=base_size, base_family=base_family)
  + theme(plot.title = element_text(face = "bold",
    size = 13, hjust = 0.5),
    text = element_text(),
    panel.background = element_rect(colour = NA),
    plot.background = element_rect(colour = NA),
    panel.border = element_rect(colour = "black"),
    axis.title = element_text(face = "bold", size = rel(0.8)),
    axis.title.y = element_text(angle=90, vjust = 2),
    axis.title.x = element_text(vjust = -0.2),
    axis.text = element_text(),
    axis.line = element_line(colour="black"),
    axis.ticks = element_line(),
    panel.grid.major = element_line(colour="#DCDCDC"),
    panel.grid.minor = element_blank(),
    legend.key = element_rect(colour = NA),
    legend.position = "bottom",
    legend.direction = "horizontal",
    legend.key.size = unit(0.5, "cm"),
    legend.margin = unit(0, "cm"),
    legend.text = element_text(face = "italic", size = rel(0.8)),
    legend.title = element_text(face="bold.italic", size = rel(0.8)),
    plot.margin=unit(c(5,5,5,5), "mm"),
    strip.background=element_rect(colour="black", fill="#DCDCDC"),
    strip.text = element_text(face="italic"),
    strip.text.y = element_blank()))

# Gráfico base de distribución de humedad de suelo.
sm.sea.dist.plot <- ggplot(seasonal.tabla.sm, aes(x = PERCEN, fill = SEASON)) +
  geom_histogram(binwidth = 1) +
  geom_density(aes(y = 1 * ..count..), color = "black", alpha = 0.5) +
  facet_grid(SEASON ~ CSC, scales = "free", as.table = T) +
  scale_fill_manual(values = c("#e7a129", "#0086a6", "#a0bd3e", "#5c7b9e")) +
  geom_vline(data = seasonal.mean.sm, aes(xintercept = sm.grp.mean),
  linetype = "dashed", size = .5, color = "red") +
  xlab("Porcentaje (%)") + ylab("Cantidad de municipios") +
  guides(fill = guide_legend(title="Estación:"))

# Representación final distribución de humedad de suelo (Figura X).
sm.sea.dist.plot + theme_Publication()

# Eliminar gráfico y tabla base.
rm(sm.sea.dist.plot, seasonal.mean.sm)

```

```

# Pruebas de homogeneidad de varianza (Fligner-Killeen). -----
# https://rpubs.com/Joaquin\_AR/218466
# https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/275445\_a32fce41aecb4bf48a39a9361add5716.html

# Cobertura Fligner-Killeen
forest_f <- fligner.test(list(cover_csc$forest, cover_no_csc$forest))
grass_f <- fligner.test(list(cover_csc$grass, cover_no_csc$grass))
crop_f <- fligner.test(list(cover_csc$crop, cover_no_csc$crop))

fligner.t <- rbind(forest_f, grass_f, crop_f); fligner.t

# Humedad de suelo Fligner-Killeen.
sm.f <- fligner.test(list(sm_csc$mean, sm_no_csc$mean)); sm.f

# Eliminar resultados test Fligner-Killeen.
rm(list = ls(pattern = "f$"), fligner.t)

# Gráficos de cajas (BOXPLOTS). -----
# Función para gráficos mejorados para publicaciones científicas (Gráficos de cajas).
theme_Publication <- function(base_size=14, base_family="helvetica") {
  library(grid)
  library(ggthemes)
  (theme_foundation(base_size=base_size, base_family=base_family)
   + theme(plot.title = element_text(face = "bold",
                                     size = 13, hjust = 0.5),
          text = element_text(),
          panel.background = element_rect(colour = NA),
          plot.background = element_rect(colour = NA),
          panel.border = element_rect(colour = "black"),
          axis.title = element_text(face = "bold", size = rel(0.8)),
          axis.title.y = element_text(angle=90, vjust = 2),
          axis.title.x = element_blank(),
          axis.text.x = element_blank(),
          axis.line = element_line(colour="black"),
          axis.ticks.x = element_blank(),
          panel.grid.major = element_line(colour="#DCDCDC"),
          panel.grid.minor = element_blank(),
          legend.key = element_rect(colour = NA),
          legend.position = "bottom",
          legend.direction = "horizontal",
          legend.key.size = unit(1, "cm"),
          legend.margin = unit(0, "cm"),
          legend.text = element_text(face = "italic", size = rel(0.8)),
          legend.title = element_text(face="bold.italic", size = rel(0.8)),
          plot.margin=unit(c(5,5,5,5),"mm"),
          strip.background=element_rect(colour="black",fill="#DCDCDC"),
          strip.text = element_text(face = "italic")
  )))

# Gráfico de cajas base coberturas.
cv.box.plot <- ggplot(tabla.cover, aes(x = CSC, y = PERCEN, fill = CSC)) +
  geom_boxplot() + facet_grid(~ COVER) + ylab("Porcentaje (%)") +
  scale_fill_manual(values = c("#9b1611", "#a7b9cd")) +
  stat_summary(fun.y = mean, geom = "point", shape = 16, size = 2, color = "white") +
  theme(axis.ticks.x = element_blank(), axis.title.x = element_blank(),
        axis.text.x = element_blank()) +
  guides(fill = guide_legend(title="Región:"))

# Representación final gráfico de cajas coberturas (Figura X).
cv.box.plot + theme_Publication()

# Eliminar gráfico y tabla base.
rm(cv.box.plot, tabla.cover)

# Gráfico de cajas base humedad de suelo.
sm.box.plot <- ggplot(seasonal.tabla.sm, aes(x = CSC, y = PERCEN, fill = CSC)) +
  geom_boxplot() + facet_grid(~ SEASON) + ylab("Porcentaje (%)") +
  scale_fill_manual(values = c("#9b1611", "#a7b9cd")) +
  stat_summary(fun.y = mean, geom = "point", shape = 16, size = 2, color = "white") +
  theme(axis.ticks.x = element_blank(), axis.title.x = element_blank(),
        axis.text.x = element_blank()) +
  guides(fill = guide_legend(title="Región:"))

# Representación final gráfico de cajas humedad de suelo (Figura X) .
sm.box.plot + theme_Publication()

# Eliminar gráfico y tabla base.
rm(sm.box.plot, seasonal.tabla.sm)

# Pruebas de significancia y comparación estadística. -----

# Humedad volumétrica a porcentaje por región.
sm_csc[, 17] <- sm_csc[, 17] * 100
sm_no_csc[, 17] <- sm_no_csc[, 17] * 100

# T-TEST o T de Student coberturas y humedad de suelo.
t.sm <- t.test(sm_csc$mean, sm_no_csc$mean)

```

```

t.forest <- t.test(cover_csc$forest, cover_no_csc$forest)
t.grass <- t.test(cover_csc$grass, cover_no_csc$grass)
t.crop <- t.test(cover_csc$crop, cover_no_csc$crop)

# Resultados t-test.
t.results <- rbind(t.sm, t.forest, t.grass, t.crop); t.results

# Eliminar resultados t-test.
rm(list = ls(pattern = "t. "))

# U mann – whitney.
u.sm <- wilcox.test(sm_csc$mean, sm_no_csc$mean, paired = F)
u.forest <- wilcox.test(cover_csc$forest, cover_no_csc$forest, paired = F)
u.crop <- wilcox.test(cover_csc$crop, cover_no_csc$crop, paired = F)
u.grass <- wilcox.test(cover_csc$grass, cover_no_csc$grass, paired = F)

# Resultados U mann – whitney.
u.results <- rbind(u.sm, u.forest, u.grass, u.crop); u.results

# Eliminar resultados U mann – whitney.
rm(list = ls(pattern = "u. "))

# Fin de rutina.

```

Anexo 6: Script R, compilación de procesos objetivo 3.

```

# Universidad de Costa Rica, Taller especializado en SIG y Teledetección, I Ciclo 2019
# Estudiante: Jorge Daniel García Girón, Carné: B12703
# Rutina para ejecutar los procesos del objetivo III, correlación
# de humedad de suelo con variables climáticas y procesamiento de datos de productividad agrícola.

# Llamada de tablas de datos con temperatura y precipitación
# procesadas por medio de estadísticas de zona en el objetivo 1.
# dataframes requeridos: sm, preci, temp.

# Librerías requeridas.
require(ggplot2)
require(reshape2)
require(plyr)

# Función para estimar las correlaciones entre humedad de suelo y variables climáticas por región.
t.corr.region <- function(v1){
  csc <- subset(v1, CSC == 1)
  n.csc <- subset(v1, CSC == 0)
  c.csc <- data.frame(cor[csc[, 7:9]])
  n.csc <- data.frame(cor[n.csc[, 7:9]])
  c.csc <- data.frame(c.csc[-1, 1])
  n.csc <- data.frame(n.csc[-1, 1])
  colnames(c.csc) <- c("cor_csc", "cor_ncsc")
  c.csc$variable <- c("precipitación", "temperatura")
  cor.t <- t(c.csc)
  colnames(cor.t) <- cor.t[,3,]
  cor.t <- data.frame(cor.t[-3,])
  cor.t$csc <- c("CSC", "NO CSC")
  cor.t$month <- deparse(substitute(v1))
  return(cor.t)}

# Correlaciones mensuales.
ene <- t.corr.region(ene_df); ene$month <- "enero"
feb <- t.corr.region(feb_df); feb$month <- "febrero"
mar <- t.corr.region(mar_df); mar$month <- "marzo"
abr <- t.corr.region(abr_df); abr$month <- "abril"
may <- t.corr.region(may_df); may$month <- "mayo"
jun <- t.corr.region(jun_df); jun$month <- "junio"
jul <- t.corr.region(jul_df); jul$month <- "julio"
ago <- t.corr.region(ago_df); ago$month <- "agosto"
sep <- t.corr.region(sep_df); sep$month <- "septiembre"
oct <- t.corr.region(oct_df); oct$month <- "octubre"
nov <- t.corr.region(nov_df); nov$month <- "noviembre"
dic <- t.corr.region(dic_df); dic$month <- "diciembre"

# Union de tablas mensuales de correlación y asignación de id.
weater_cor <- rbind(ene, feb, mar, abr, may, jun, jul, ago, sep, oct, nov, dic)
weater_cor$id <- seq.int(nrow(weater_cor))

# Tabulación y procesamiento de tabla base de correlaciones.
t.weater.cor.t <- melt(weater_cor, id = "id")
t.weater.csc <- subset(t.weater.cor.t, variable == "csc")
t.weater.month <- t.weater.cor.t[,73:96,]
t.weater.final <- t.weater.cor.t[,1:48,]
t.weater.final <- merge(t.weater.final, t.weater.csc, by = "id")
t.weater.final <- merge(t.weater.final, t.weater.month, by = "id")
t.weater.final <- t.weater.final[, -c(4, 6)]
names(t.weater.final) <- c("id", "variable", "correlation", "csc", "month")
t.weater.final$correlation <- as.numeric(t.weater.final$correlation)
t.weater.final$csc <- factor(t.weater.final$csc)
nivel <- c("enero", "febrero", "marzo", "abril", "mayo", "junio", "julio",

```

```

"agosto", "septiembre", "octubre", "noviembre", "diciembre")
nivel2 <- c("precipitación", "temperatura")
t.weater.final$variable <- factor(t.weater.final$variable, levels = nivel2)
t.weater.final$month <- factor(t.weater.final$month, levels = nivel)

# Gráfico base de correlaciones por mes.
weater.plot.cor <- ggplot(data = t.weater.final, aes(x = csc, y = correlation)) +
  geom_bar(position="dodge", stat = "identity", aes(fill = variable), width = .75) +
  scale_fill_manual(values = c("#5b7a9d", "#b53038")) +
  facet_wrap(~ month) +
  geom_hline(yintercept = 0) +
  ylab("Coeficiente de correlación de Pearson") +
  xlab("Región") +
  guides(fill = guide_legend(title="Variable:"))

# Función para gráficos mejorados para publicaciones científicas (Gráfico correlación
# humedad de suelo y variables climáticas).
theme_Publication <- function(base_size=14, base_family="helvetica") {
  library(grid)
  library(ggthemes)
  (theme_foundation(base_size=base_size, base_family=base_family)
  + theme(plot.title = element_text(face = "bold",
    size = rel(1.2), hjust = 0.5),
    text = element_text(),
    panel.background = element_rect(colour = NA),
    plot.background = element_rect(colour = NA),
    panel.border = element_rect(colour = "black"),
    axis.title = element_text(face = "bold", size = rel(0.8)),
    axis.title.y = element_text(angle=90, vjust = 2),
    axis.title.x = element_text(vjust = -0.2),
    axis.text = element_text(),
    axis.line = element_line(colour="black"),
    axis.ticks = element_line(),
    panel.grid.major = element_line(colour="#DCDCDC"),
    panel.grid.minor = element_blank(),
    legend.key = element_rect(colour = NA),
    legend.position = "bottom",
    legend.direction = "horizontal",
    legend.key.size= unit(0.5, "cm"),
    legend.margin = unit(0, "cm"),
    legend.text = element_text(face = "italic", size = rel(0.8)),
    legend.title = element_text(face="bold.italic", size = rel(0.8)),
    plot.margin=unit(c(5,5,5,5),"mm"),
    strip.background=element_rect(colour="black",fill="#DCDCDC"),
    strip.text = element_text(face = "italic"))))

# Representación final correlaciones humedad de suelo y variables climáticas (Figura X).
weater.plot.cor + theme_Publication()

# -----

# Procesamiento de datos Global Spatially-Disaggregated Crop Production
# Statistics Data for 2010 Version 1.0 para mapas de calor.

# Librería requerida.
requiere(raster)

# Ruta de datos.
setwd("H:/MAESTRÍA/TESIGT II/Global Spatially-Disaggregated Crop Production Statistics Data for 2010 Version 1.0/spam2010v1r0_global_phys_area.geotiff")

# Llamado de capas ráster por cultivo.
cafe <- raster("spam2010v1r0_global_physical-area_acof_a.tif")
caña <- raster("spam2010v1r0_global_physical-area_sugc_a.tif")
banano <- raster("spam2010v1r0_global_physical-area_bana_a.tif")
tabaco <- raster("spam2010v1r0_global_physical-area_toba_a.tif")
cacao <- raster("spam2010v1r0_global_physical-area_coco_a.tif")
algodon <- raster("spam2010v1r0_global_physical-area_cott_a.tif")
frijol <- raster("spam2010v1r0_global_physical-area_bean_a.tif")
maiz <- raster("spam2010v1r0_global_physical-area_maiz_a.tif")
arroz <- raster("spam2010v1r0_global_physical-area_rice_a.tif")
sorgo <- raster("spam2010v1r0_global_physical-area_sorg_a.tif")
fruit <- raster("spam2010v1r0_global_physical-area_trof_a.tif")

# Llamado de capa vectorial de AC para recorte de por recuadro.
AC <- shapefile("H:/MAESTRÍA/TESIGT III/AC_NOT_BELIZE/AC_WB_NB.shp")

# Recorte ráster de datos espaciales de productividad agrícola.
cafe <- crop(cafe, AC)
caña <- crop(caña, AC)
banano <- crop(banano, AC)
tabaco <- crop(tabaco, AC)
cacao <- crop(cacao, AC)
algodon <- crop(algodon, AC)
frijol <- crop(frijol, AC)
maiz <- crop(maiz, AC)
arroz <- crop(arroz, AC)
sorgo <- crop(sorgo, AC)
fruit <- crop(fruit, AC)

```

```
# Función para generar puntos con valores de HA por cultivo, para representación de
# mapas de calor en QGIS.
crop_shp <- function(v1){
  setwd("H:/MAESTRÍA/TESIGT III/Datos_Objetoivo_3/Cultivos_raster/vector")
  pts <- rasterToPoints(v1)
  pts.df <- as.data.frame(pts)
  names(pts.df) <- c("x", "y", "HA")
  coordinates(pts.df) = ~ x + y
  crs(pts.df) = "+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs"
  shapefile(pts.df, deparse(substitute(v1)), overwrite = T)}

# Ejecución de función para cada cultivo y escritura de archivo shp de puntos.
crop_shp(cafe)
crop_shp(caña)
crop_shp(banano)
crop_shp(tabaco)
crop_shp(cacao)
crop_shp(algodon)
crop_shp(frijol)
crop_shp(maiz)
crop_shp(arroz)
crop_shp(sorgo)
crop_shp(fruit)

# Fin de rutina.
```

Anexo 7: Municipios clasificados como parte del CSC, con su porcentaje de área correspondiente.

País	Dpto/Prov	Municipio/Cantón	Id	% CSC	País	Dpto/Prov	Municipio/Cantón	Id	% CSC	País	Dpto/Prov	Municipio/Cantón	Id	% CSC
El Salvador	Ahuachapán	Ahuachapán	6	100.00	Nicaragua	Chontales	San Pedro de Lóvago	384	35.20	Honduras	Santa Bárbara	Protección	739	100.00
El Salvador	Ahuachapán	Apaneca	7	100.00	Nicaragua	Estelí	Condega	388	100.00	Honduras	Santa Bárbara	Quimistán	740	49.85
El Salvador	Ahuachapán	Atiquizaya	8	100.00	Nicaragua	Estelí	Estelí	389	100.00	Honduras	Santa Bárbara	San José de Colinas	742	62.75
El Salvador	Ahuachapán	Concepción de Ataco	9	100.00	Nicaragua	Estelí	La Trinidad	390	100.00	Honduras	Santa Bárbara	San Luis	743	99.65
El Salvador	Ahuachapán	El Refugio	10	100.00	Nicaragua	Estelí	Pueblo Nuevo	391	70.49	Honduras	Santa Bárbara	San Marcos	744	96.14
El Salvador	Ahuachapán	Guaymango	11	97.27	Nicaragua	Estelí	San Juan de Limay	392	96.82	Honduras	Santa Bárbara	San Nicolás	745	97.19
El Salvador	Ahuachapán	Jujutla	12	75.06	Nicaragua	Estelí	San Nicolás	393	100.00	Honduras	Santa Bárbara	San Vicente Centenario	747	42.27
El Salvador	Ahuachapán	San Francisco Menéndez	13	73.64	Nicaragua	Granada	Diriá	394	100.00	Honduras	Valle	Aramecina	752	73.03
El Salvador	Ahuachapán	San Lorenzo	14	100.00	Nicaragua	Granada	Diriomo	395	100.00	Honduras	Valle	Caridad	753	98.48
El Salvador	Ahuachapán	San Pedro Puxtla	15	100.00	Nicaragua	Granada	Granada	396	43.88	Honduras	Valle	Goascorán	754	82.08
El Salvador	Ahuachapán	Tacuba	16	100.00	Nicaragua	Granada	Nandaimé	397	54.89	Honduras	Valle	Langue	755	100.00
El Salvador	Ahuachapán	Turín	17	100.00	Nicaragua	Jinotega	La Concordia	400	100.00	Honduras	Valle	Nacaome	756	57.27
El Salvador	Cabañas	Cinquera	18	100.00	Nicaragua	Jinotega	San Rafael del Norte	401	51.22	Honduras	Valle	San Francisco de Coray	757	100.00
El Salvador	Cabañas	Dolores	19	100.00	Nicaragua	Jinotega	San Sebastián de Yalí	402	94.06	Honduras	Valle	San Lorenzo	758	64.43
El Salvador	Cabañas	Guacotectí	20	100.00	Nicaragua	Jinotega	Wiwilí	404	41.32	Honduras	Yoro	Jocón	762	69.24
El Salvador	Cabañas	Ilobasco	21	100.00	Nicaragua	León	Achuapa	405	99.52	Honduras	Yoro	Santa Rita	765	57.04
El Salvador	Cabañas	Jutiapa	22	100.00	Nicaragua	León	El Jicaral	406	57.82	Honduras	Yoro	Sulaco	766	100.00
El Salvador	Cabañas	San Isidro	23	100.00	Nicaragua	León	El Sauce	407	89.86	Honduras	Yoro	Victoria	767	83.66
El Salvador	Cabañas	Sensuntepeque	24	100.00	Nicaragua	León	La Paz Centro	408	60.32	Honduras	Yoro	Yorito	768	100.00
El Salvador	Cabañas	Tejutepeque	25	100.00	Nicaragua	León	Larreynaga-Malpasillo	409	68.51	Honduras	Yoro	Yoro	769	80.64
El Salvador	Cabañas	Victoria	26	100.00	Nicaragua	León	León	410	43.70	Guatemala	Baja Verapaz	Cubulco	785	91.52
El Salvador	Chalatenango	Agua Caliente	27	100.00	Nicaragua	León	Nagarote	411	46.80	Guatemala	Baja Verapaz	Granados	786	100.00
El Salvador	Chalatenango	Arcatao	28	100.00	Nicaragua	León	Quezalaguaque	412	38.75	Guatemala	Baja Verapaz	Rabinal	788	87.26
El Salvador	Chalatenango	Azacualpa	29	99.78	Nicaragua	León	Santa Rosa del Peñón	413	100.00	Guatemala	Baja Verapaz	Salamá	789	60.82
El Salvador	Chalatenango	Chalatenango	30	74.93	Nicaragua	León	Telica	414	76.51	Guatemala	Baja Verapaz	San Jerónimo	790	67.28
El Salvador	Chalatenango	Citalá	31	100.00	Nicaragua	Madriz	Palacaguina	416	100.00	Guatemala	Baja Verapaz	San Miguel Chicaj	791	57.16
El Salvador	Chalatenango	Comalapa	32	36.61	Nicaragua	Madriz	San José de Cusmapa	417	96.22	Guatemala	Baja Verapaz	Santa Cruz El Chol	792	100.00
El Salvador	Chalatenango	Dulce Nombre de María	34	100.00	Nicaragua	Madriz	San Juan del Río Coco	418	100.00	Guatemala	Chimaltenango	Acatenango	793	64.66
El Salvador	Chalatenango	El Carrizal	35	89.00	Nicaragua	Madriz	San Lucas	419	76.80	Guatemala	Chimaltenango	Chimaltenango	794	100.00
El Salvador	Chalatenango	El Paraíso	36	57.12	Nicaragua	Madriz	Somoto	420	100.00	Guatemala	Chimaltenango	Comalapa	795	100.00
El Salvador	Chalatenango	La Laguna	37	46.93	Nicaragua	Madriz	Telpaneca	421	100.00	Guatemala	Chimaltenango	El Tejar	796	100.00
El Salvador	Chalatenango	La Palma	38	100.00	Nicaragua	Madriz	Totagalpa	422	100.00	Guatemala	Chimaltenango	Parramos	797	100.00
El Salvador	Chalatenango	La Reina	39	98.63	Nicaragua	Madriz	Yalaguina	423	100.00	Guatemala	Chimaltenango	Patzún	798	100.00
El Salvador	Chalatenango	Nombre de Jesús	41	100.00	Nicaragua	Managua	Managua	424	92.61	Guatemala	Chimaltenango	Patzicía	799	100.00
El Salvador	Chalatenango	Nueva Concepción	42	70.87	Nicaragua	Managua	Mateare	425	81.33	Guatemala	Chimaltenango	Pochuta	800	98.96
El Salvador	Chalatenango	Nueva Trinidad	43	100.00	Nicaragua	Managua	San Francisco Libre	426	51.46	Guatemala	Chimaltenango	San Andrés Itzapa	801	100.00
El Salvador	Chalatenango	Ojos de Agua	44	90.75	Nicaragua	Managua	San Rafael del Sur	427	51.13	Guatemala	Chimaltenango	San José Poaquil	802	100.00
El Salvador	Chalatenango	Potonico	45	100.00	Nicaragua	Managua	Ticunantepe	428	100.00	Guatemala	Chimaltenango	San Martín Jilotepeque	803	100.00
El Salvador	Chalatenango	San Antonio de la Cruz	46	100.00	Nicaragua	Managua	Tipitapa	429	54.08	Guatemala	Chimaltenango	Santa Apolonia	804	100.00
El Salvador	Chalatenango	San Antonio Los Ranchos	47	100.00	Nicaragua	Masaya	Catarina	431	100.00	Guatemala	Chimaltenango	Santa Cruz Balanyá	805	100.00
El Salvador	Chalatenango	San Fernando	48	100.00	Nicaragua	Masaya	La Concepción	432	100.00	Guatemala	Chimaltenango	Tecpán Guatemala	806	100.00
El Salvador	Chalatenango	San Francisco Lempa	49	100.00	Nicaragua	Masaya	Masatepe	433	100.00	Guatemala	Chimaltenango	Yepocapa	807	40.13
El Salvador	Chalatenango	San Francisco Morazán	50	100.00	Nicaragua	Masaya	Masaya	434	100.00	Guatemala	Chimaltenango	Zaragoza	808	100.00
El Salvador	Chalatenango	San Ignacio	51	100.00	Nicaragua	Masaya	Nandasmo	435	100.00	Guatemala	Chiquimula	Camotán	809	100.00
El Salvador	Chalatenango	San Isidro Labrador	52	100.00	Nicaragua	Masaya	Nindirí	436	89.84	Guatemala	Chiquimula	Chiquimula	810	100.00
El Salvador	Chalatenango	San José Cancasque	53	100.00	Nicaragua	Masaya	Niquinohomo	437	100.00	Guatemala	Chiquimula	Concepción Las Minas	811	100.00
El Salvador	Chalatenango	San José Las Flores	54	100.00	Nicaragua	Masaya	San Juan de Oriente	438	100.00	Guatemala	Chiquimula	Esquipulas	812	100.00
El Salvador	Chalatenango	San Luis del Carmen	55	100.00	Nicaragua	Masaya	Tisma	439	55.50	Guatemala	Chiquimula	Ipala	813	100.00
El Salvador	Chalatenango	San Miguel de Mercedes	56	100.00	Nicaragua	Matagalpa	Ciudad Dario	440	83.41	Guatemala	Chiquimula	Jocotán	814	100.00
El Salvador	Chalatenango	San Rafael	57	79.01	Nicaragua	Matagalpa	Esquipulas	441	91.57	Guatemala	Chiquimula	Olopa	815	100.00
El Salvador	Chalatenango	Santa Rita	58	53.44	Nicaragua	Matagalpa	Matagalpa	442	78.85	Guatemala	Chiquimula	Quezaltepeque	816	100.00
El Salvador	Chalatenango	Tejutla	59	79.36	Nicaragua	Matagalpa	Sébcaco	447	81.00	Guatemala	Chiquimula	San Jacinto	817	100.00
El Salvador	Cuscatlán	Candelaria	60	100.00	Nicaragua	Matagalpa	San Dionisio	448	100.00	Guatemala	Chiquimula	San José La Arada	818	100.00
El Salvador	Cuscatlán	Cojutepeque	61	100.00	Nicaragua	Matagalpa	San Isidro	449	74.57	Guatemala	Chiquimula	San Juan Ermita	819	100.00
El Salvador	Cuscatlán	El Carmen	62	100.00	Nicaragua	Matagalpa	Terrabona	451	100.00	Guatemala	El Progreso	El Jicaró	820	100.00
El Salvador	Cuscatlán	El Rosario	63	100.00	Nicaragua	Nueva Segovia	Ciudad Antigua	453	100.00	Guatemala	El Progreso	Guastatoya	821	100.00
El Salvador	Cuscatlán	Monte San Juan	64	100.00	Nicaragua	Nueva Segovia	Ciudad Sandino	454	100.00	Guatemala	El Progreso	Morazán	822	94.27
El Salvador	Cuscatlán	Oratorio de Concepción	65	100.00	Nicaragua	Nueva Segovia	Dipilto	455	100.00	Guatemala	El Progreso	San Agustín Acasaguastlán	823	77.74
El Salvador	Cuscatlán	San Bartolomé Perulapía	66	100.00	Nicaragua	Nueva Segovia	Jalapa	456	88.16	Guatemala	El Progreso	San Antonio La Paz	824	100.00
El Salvador	Cuscatlán	San Cristóbal	67	100.00	Nicaragua	Nueva Segovia	Macuelizo	457	100.00	Guatemala	El Progreso	San Cristóbal Acasaguastlán	825	62.18
El Salvador	Cuscatlán	San José Guayabal	68	100.00	Nicaragua	Nueva Segovia	Mozonte	458	100.00	Guatemala	El Progreso	Sanarate	826	100.00

El Salvador	Cuscatlán	San Pedro Perulapán	69	100.00	Nicaragua	Nueva Segovia	Murra	459	99.97	Guatemala	El Progreso	Sansare	827	100.00
El Salvador	Cuscatlán	San Rafael Cedros	70	100.00	Nicaragua	Nueva Segovia	Ocotal	460	100.00	Guatemala	Escuintla	Escuintla	828	67.84
El Salvador	Cuscatlán	San Ramón	71	100.00	Nicaragua	Nueva Segovia	Quilalí	461	100.00	Guatemala	Escuintla	Guanagazapa	829	59.92
El Salvador	Cuscatlán	Santa Cruz Analquito	72	100.00	Nicaragua	Nueva Segovia	San Fernando	462	100.00	Guatemala	Escuintla	La Gomera	832	47.15
El Salvador	Cuscatlán	Santa Cruz Michapa	73	100.00	Nicaragua	Nueva Segovia	Santa María	463	100.00	Guatemala	Escuintla	Nueva Concepción	834	44.37
El Salvador	Cuscatlán	Suchitoto	74	86.48	Nicaragua	Rivas	Altigracia	469	80.21	Guatemala	Escuintla	Palín	835	100.00
El Salvador	Cuscatlán	Tenancingo	75	100.00	Nicaragua	Rivas	Belén	470	99.72	Guatemala	Escuintla	San José	836	37.85
El Salvador	La Libertad	Antiguo Cuscatlán	76	100.00	Nicaragua	Rivas	Moyogalpa	472	77.99	Guatemala	Escuintla	San Vicente Pacaya	837	100.00
El Salvador	La Libertad	Chiltupán	77	88.91	Nicaragua	Rivas	Potosí	473	58.22	Guatemala	Escuintla	Siquinalá	839	56.85
El Salvador	La Libertad	Ciudad Arce	78	46.17	Nicaragua	Rivas	Rivas	474	92.93	Guatemala	Guatemala	Amatitlán	841	100.00
El Salvador	La Libertad	Colón	79	92.10	Nicaragua	Rivas	Tola	476	85.90	Guatemala	Guatemala	Chinautla	842	100.00
El Salvador	La Libertad	Comasagua	80	100.00	Honduras	Choluteca	Apacilagua	485	98.09	Guatemala	Guatemala	Chuarrancho	843	100.00
El Salvador	La Libertad	Huizúcar	81	100.00	Honduras	Choluteca	Choluteca	486	39.07	Guatemala	Guatemala	Fraijanes	844	100.00
El Salvador	La Libertad	Jayaque	82	100.00	Honduras	Choluteca	Concepción de María	487	93.96	Guatemala	Guatemala	Mixco	845	100.00
El Salvador	La Libertad	Jicalapa	83	100.00	Honduras	Choluteca	Duyure	488	100.00	Guatemala	Guatemala	Palencia	846	100.00
El Salvador	La Libertad	La Libertad	84	48.94	Honduras	Choluteca	El Corpus	489	100.00	Guatemala	Guatemala	Petapa	847	100.00
El Salvador	La Libertad	Nueva San Salvador	85	100.00	Honduras	Choluteca	El Triunfo	490	51.89	Guatemala	Guatemala	San José del Golfo	848	100.00
El Salvador	La Libertad	Nuevo Cuscatlán	86	100.00	Honduras	Choluteca	Marcovia	491	44.52	Guatemala	Guatemala	San José Pinula	849	100.00
El Salvador	La Libertad	Opico	87	88.76	Honduras	Choluteca	Morolica	492	100.00	Guatemala	Guatemala	San Juan Sacatepéquez	850	100.00
El Salvador	La Libertad	Quezaltepeque	88	99.88	Honduras	Choluteca	Namasigue	493	73.34	Guatemala	Guatemala	San Pedro Ayampuc	851	100.00
El Salvador	La Libertad	Sacacoyo	89	86.14	Honduras	Choluteca	Orocuina	494	100.00	Guatemala	Guatemala	San Pedro Sacatepéquez	852	100.00
El Salvador	La Libertad	San José Villanueva	90	100.00	Honduras	Choluteca	Pespire	495	99.72	Guatemala	Guatemala	San Raymundo	853	100.00
El Salvador	La Libertad	San Matías	91	96.62	Honduras	Choluteca	San Antonio de Flores	496	100.00	Guatemala	Guatemala	Santa Catarina Pinula	854	100.00
El Salvador	La Libertad	San Pablo Tacachico	92	58.32	Honduras	Choluteca	San Isidro	497	100.00	Guatemala	Guatemala	Villa Canales	855	100.00
El Salvador	La Libertad	Talnique	93	100.00	Honduras	Choluteca	San José	498	100.00	Guatemala	Guatemala	Villa Nueva	856	100.00
El Salvador	La Libertad	Tamanique	94	97.09	Honduras	Choluteca	San Marcos de Colón	499	100.00	Guatemala	Guatemala	ZONA 10	857	100.00
El Salvador	La Libertad	Teotepique	95	91.77	Honduras	Choluteca	Santa Ana de Yusguare	500	61.88	Guatemala	Guatemala	ZONA 11	858	100.00
El Salvador	La Libertad	Tepecoyo	96	100.00	Honduras	Comayagua	Ajuterique	511	97.67	Guatemala	Guatemala	ZONA 12	859	100.00
El Salvador	La Libertad	Zaragoza	97	100.00	Honduras	Comayagua	Comayagua	512	94.86	Guatemala	Guatemala	ZONA 13	860	100.00
El Salvador	La Paz	Cuyultitán	98	100.00	Honduras	Comayagua	El Rosario	513	94.86	Guatemala	Guatemala	ZONA 14	861	100.00
El Salvador	La Paz	Jerusalén	100	100.00	Honduras	Comayagua	Esquías	514	100.00	Guatemala	Guatemala	ZONA 15	862	100.00
El Salvador	La Paz	Mercedes La Ceiba	101	100.00	Honduras	Comayagua	Humuya	515	96.76	Guatemala	Guatemala	ZONA 16	863	100.00
El Salvador	La Paz	Olocuilta	102	97.11	Honduras	Comayagua	La Libertad	516	90.51	Guatemala	Guatemala	ZONA 17	864	100.00
El Salvador	La Paz	Paraiso de Osorio	103	100.00	Honduras	Comayagua	La Trinidad	517	66.67	Guatemala	Guatemala	ZONA 18	865	100.00
El Salvador	La Paz	San Antonio Masahuat	104	100.00	Honduras	Comayagua	Lamaní	518	95.20	Guatemala	Guatemala	ZONA 19	866	100.00
El Salvador	La Paz	San Emigdio	105	100.00	Honduras	Comayagua	Las Lajas	519	43.50	Guatemala	Guatemala	ZONA 1	867	100.00
El Salvador	La Paz	San Francisco Chinameca	106	100.00	Honduras	Comayagua	Lejmaní	520	92.35	Guatemala	Guatemala	ZONA 22	868	100.00
El Salvador	La Paz	San Juan Nonualco	107	74.10	Honduras	Comayagua	Minas de Oro	522	100.00	Guatemala	Guatemala	ZONA 24	869	100.00
El Salvador	La Paz	San Juan Talpa	108	98.52	Honduras	Comayagua	Ojo de Agua	523	52.59	Guatemala	Guatemala	ZONA 25	870	100.00
El Salvador	La Paz	San Juan Tepezontes	109	100.00	Honduras	Comayagua	San Jerónimo	524	100.00	Guatemala	Guatemala	ZONA 2	871	100.00
El Salvador	La Paz	San Luis Talpa	111	68.18	Honduras	Comayagua	San José del Potrero	526	100.00	Guatemala	Guatemala	ZONA 3	872	100.00
El Salvador	La Paz	San Miguel Tepezontes	112	100.00	Honduras	Comayagua	San Luis	527	100.00	Guatemala	Guatemala	ZONA 4	873	100.00
El Salvador	La Paz	San Pedro Nonualco	114	100.00	Honduras	Comayagua	San Sebastián	528	77.09	Guatemala	Guatemala	ZONA 5	874	100.00
El Salvador	La Paz	San Rafael Obrajuelo	115	69.31	Honduras	Comayagua	Villa de San Antonio	531	77.38	Guatemala	Guatemala	ZONA 6	875	100.00
El Salvador	La Paz	Santa María Ostuma	116	100.00	Honduras	Copán	Cabañas	532	100.00	Guatemala	Guatemala	ZONA 7	876	100.00
El Salvador	La Paz	Santiago Nonualco	117	47.44	Honduras	Copán	Concepción	533	100.00	Guatemala	Guatemala	ZONA 8	877	100.00
El Salvador	La Paz	Tapalhuaca	118	98.24	Honduras	Copán	Copán Ruinas	534	78.23	Guatemala	Guatemala	ZONA 9	878	100.00
El Salvador	La Paz	Zacatecoluca	119	48.42	Honduras	Copán	Corquín	535	100.00	Guatemala	Huehuetenango	Colotenango	881	100.00
El Salvador	La Unión	Anamorós	120	90.98	Honduras	Copán	Cucuyagua	536	100.00	Guatemala	Huehuetenango	Cuilco	883	58.35
El Salvador	La Unión	Bolívar	121	100.00	Honduras	Copán	Dolores	537	100.00	Guatemala	Huehuetenango	Huehuetenango	884	96.55
El Salvador	La Unión	Concepción de Oriente	122	57.99	Honduras	Copán	Dulce Nombre	538	100.00	Guatemala	Huehuetenango	Jacaltenango	885	49.40
El Salvador	La Unión	Conchagua	123	81.65	Honduras	Copán	El Paraiso	539	59.51	Guatemala	Huehuetenango	La Democracia	886	81.30
El Salvador	La Unión	El Carmen	124	96.35	Honduras	Copán	La Jigua	541	95.89	Guatemala	Huehuetenango	La Libertad	887	93.26
El Salvador	La Unión	El Sauce	125	81.01	Honduras	Copán	La Unión	542	100.00	Guatemala	Huehuetenango	Malacatancito	888	82.41
El Salvador	La Unión	Intipucá	126	93.40	Honduras	Copán	Nueva Arcadia	543	100.00	Guatemala	Huehuetenango	San Gaspar Ixchil	891	100.00
El Salvador	La Unión	La Unión	127	93.83	Honduras	Copán	San Agustín	544	100.00	Guatemala	Huehuetenango	San Ildefonso Ixtahuacán	892	92.75
El Salvador	La Unión	Lislique	128	100.00	Honduras	Copán	San Antonio	545	95.36	Guatemala	Huehuetenango	San Juan Atitán	893	100.00
El Salvador	La Unión	Nueva Esparta	129	100.00	Honduras	Copán	San Jerónimo	546	100.00	Guatemala	Huehuetenango	San Pedro Necta	897	64.64
El Salvador	La Unión	Polorós	131	99.13	Honduras	Copán	San José	547	100.00	Guatemala	Huehuetenango	San Rafael Petzal	899	100.00
El Salvador	La Unión	San Alejo	132	74.93	Honduras	Copán	San Juan de Opoa	548	100.00	Guatemala	Huehuetenango	San Sebastián Huehuetenango	901	100.00
El Salvador	La Unión	San José	133	99.45	Honduras	Copán	San Nicolás	549	100.00	Guatemala	Huehuetenango	Santa Ana Huista	902	56.66
El Salvador	La Unión	Santa Rosa de Lima	134	81.54	Honduras	Copán	San Pedro	550	100.00	Guatemala	Huehuetenango	Santa Bárbara	903	97.98
El Salvador	La Unión	Yyantique	135	100.00	Honduras	Copán	Santa Rita	551	100.00	Guatemala	Huehuetenango	Santiago Chimaltenango	906	68.20
El Salvador	La Unión	Yucuaiquín	136	100.00	Honduras	Copán	Santa Rosa de Copán	552	100.00	Guatemala	Huehuetenango	Todos Santos Cuchumatán	909	63.52
El Salvador	Morazán	Arambala	137	100.00	Honduras	Copán	Trinidad	553	100.00	Guatemala	Jalapa	Jalapa	916	100.00

El Salvador	Morazán	Cacaopera	138	100.00	Honduras	Copán	Veracruz	554	100.00	Guatemala	Jalapa	Mataquesuintia	917	100.00
El Salvador	Morazán	Chilanga	139	100.00	Honduras	El Paraíso	Alauca	567	100.00	Guatemala	Jalapa	Monjas	918	100.00
El Salvador	Morazán	Corinto	140	100.00	Honduras	El Paraíso	Danlí	568	98.06	Guatemala	Jalapa	San Carlos Alzatate	919	100.00
El Salvador	Morazán	Delicias de Concepción	141	100.00	Honduras	El Paraíso	El Paraíso	569	100.00	Guatemala	Jalapa	San Luis Jilotepeque	920	100.00
El Salvador	Morazán	El Divisadero	142	79.53	Honduras	El Paraíso	Guinope	570	100.00	Guatemala	Jalapa	San Manuel Chaparrón	921	100.00
El Salvador	Morazán	El Rosario	143	100.00	Honduras	El Paraíso	Jacaleapa	571	77.61	Guatemala	Jalapa	San Pedro Pinula	922	100.00
El Salvador	Morazán	Gualococti	144	100.00	Honduras	El Paraíso	Liure	572	100.00	Guatemala	Jutiapa	Agua Blanca	923	99.92
El Salvador	Morazán	Guatajiagua	145	81.51	Honduras	El Paraíso	Morocelí	573	73.99	Guatemala	Jutiapa	Asunción Mita	924	93.06
El Salvador	Morazán	Jocateca	146	100.00	Honduras	El Paraíso	Oropolí	574	100.00	Guatemala	Jutiapa	Atescatempa	925	100.00
El Salvador	Morazán	Jocoaitique	147	100.00	Honduras	El Paraíso	Potrerrillos	575	94.18	Guatemala	Jutiapa	Comapa	926	100.00
El Salvador	Morazán	Jocoro	148	97.14	Honduras	El Paraíso	San Antonio de Flores	576	100.00	Guatemala	Jutiapa	Conguaco	927	100.00
El Salvador	Morazán	Lolotiquillo	149	100.00	Honduras	El Paraíso	San Lucas	577	100.00	Guatemala	Jutiapa	El Adelanto	928	100.00
El Salvador	Morazán	Meanguera	150	100.00	Honduras	El Paraíso	San Matías	578	100.00	Guatemala	Jutiapa	El Progreso	929	100.00
El Salvador	Morazán	Osicala	151	100.00	Honduras	El Paraíso	Soledad	579	100.00	Guatemala	Jutiapa	Jalpatagua	930	100.00
El Salvador	Morazán	Perquín	152	100.00	Honduras	El Paraíso	Teupasentí	580	100.00	Guatemala	Jutiapa	Jerez	931	100.00
El Salvador	Morazán	San Fernando	154	100.00	Honduras	El Paraíso	Texiguat	581	100.00	Guatemala	Jutiapa	Jutiapa	932	100.00
El Salvador	Morazán	San Francisco Gotera	155	69.18	Honduras	El Paraíso	Trojes	582	96.33	Guatemala	Jutiapa	Moyuta	933	55.60
El Salvador	Morazán	San Isidro	156	100.00	Honduras	El Paraíso	Vado Ancho	583	100.00	Guatemala	Jutiapa	Pasaco	934	46.48
El Salvador	Morazán	San Simón	157	100.00	Honduras	El Paraíso	Yauyupe	584	100.00	Guatemala	Jutiapa	Quezada	935	100.00
El Salvador	Morazán	Sensembra	158	100.00	Honduras	El Paraíso	Yuscarán	585	97.33	Guatemala	Jutiapa	San José Acatempa	936	100.00
El Salvador	Morazán	Sociedad	159	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Alubarén	586	100.00	Guatemala	Jutiapa	Santa Catarina Mita	937	100.00
El Salvador	Morazán	Torola	160	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Cedros	587	93.85	Guatemala	Jutiapa	Yupiltepeque	938	100.00
El Salvador	Morazán	Yamabal	161	65.73	Honduras	Francisco Morazán	Curarén	588	100.00	Guatemala	Jutiapa	Zapotitlán	939	100.00
El Salvador	Morazán	Yoloaiquín	162	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Distrito Central	589	100.00	Guatemala	Quezaltenango	Almolonga	952	100.00
El Salvador	San Miguel	Carolina	163	100.00	Honduras	Francisco Morazán	El Porvenir	590	100.00	Guatemala	Quezaltenango	Cabricán	953	100.00
El Salvador	San Miguel	Chapeltique	164	57.56	Honduras	Francisco Morazán	Gualimaca	591	90.93	Guatemala	Quezaltenango	Cajolá	954	94.13
El Salvador	San Miguel	Chinameca	165	100.00	Honduras	Francisco Morazán	La Libertad	592	100.00	Guatemala	Quezaltenango	Cantel	955	100.00
El Salvador	San Miguel	Chirilagua	166	86.30	Honduras	Francisco Morazán	La Venta	593	100.00	Guatemala	Quezaltenango	Concepción Chiquirichapa	958	41.12
El Salvador	San Miguel	Ciudad Barrios	167	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Lepaterique	594	100.00	Guatemala	Quezaltenango	Flores Costa Cuca	960	39.86
El Salvador	San Miguel	Comacarán	168	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Maraita	595	100.00	Guatemala	Quezaltenango	Génova	961	35.92
El Salvador	San Miguel	El Tránsito	169	73.81	Honduras	Francisco Morazán	Marale	596	100.00	Guatemala	Quezaltenango	Huitán	962	92.21
El Salvador	San Miguel	Lolotique	170	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Nueva Armenia	597	100.00	Guatemala	Quezaltenango	La Esperanza	963	100.00
El Salvador	San Miguel	Moncagua	171	93.04	Honduras	Francisco Morazán	Ojojona	598	100.00	Guatemala	Quezaltenango	Olintepeque	964	100.00
El Salvador	San Miguel	Nueva Guadalupe	172	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Orica	599	100.00	Guatemala	Quezaltenango	Quetzaltenango	967	86.19
El Salvador	San Miguel	Nuevo Edén de San Juan	173	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Reitoca	600	100.00	Guatemala	Quezaltenango	Salcájá	968	100.00
El Salvador	San Miguel	Quelepa	174	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Sabanagrande	601	100.00	Guatemala	Quezaltenango	San Carlos Sija	969	100.00
El Salvador	San Miguel	San Antonio	175	100.00	Honduras	Francisco Morazán	San Antonio de Oriente	602	99.63	Guatemala	Quezaltenango	San Francisco La Unión	970	100.00
El Salvador	San Miguel	San Gerardo	176	100.00	Honduras	Francisco Morazán	San Buenaventura	603	100.00	Guatemala	Quezaltenango	San Mateo	972	91.54
El Salvador	San Miguel	San Jorge	177	100.00	Honduras	Francisco Morazán	San Ignacio	604	100.00	Guatemala	Quezaltenango	San Miguel Sigüilá	973	70.86
El Salvador	San Miguel	San Luis de la Reina	178	100.00	Honduras	Francisco Morazán	San Juan de Flores	605	100.00	Guatemala	Quezaltenango	Sibilia	974	76.96
El Salvador	San Miguel	San Miguel	179	77.87	Honduras	Francisco Morazán	San Miguelito	606	100.00	Guatemala	Quezaltenango	Zunil	975	71.53
El Salvador	San Miguel	San Rafael	180	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Santa Ana	607	100.00	Guatemala	Quiché	Chiché	979	100.00
El Salvador	San Miguel	Sesori	181	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Santa Lucía	608	100.00	Guatemala	Quiché	Chichicastenango	980	100.00
El Salvador	San Miguel	Uluazapa	182	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Talanga	609	87.36	Guatemala	Quiché	Chinique	981	100.00
El Salvador	San Salvador	Aguilares	183	52.07	Honduras	Francisco Morazán	Tatumbula	610	100.00	Guatemala	Quiché	Joyabaj	984	100.00
El Salvador	San Salvador	Apopa	184	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Valle de Ángeles	611	97.46	Guatemala	Quiché	Pachalúm	986	100.00
El Salvador	San Salvador	Ayutxtepeque	185	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Vallecillo	612	100.00	Guatemala	Quiché	Patzitá	987	100.00
El Salvador	San Salvador	Cuscatancingo	186	100.00	Honduras	Francisco Morazán	Villa de San Francisco	613	87.90	Guatemala	Quiché	Sacapulas	988	60.15
El Salvador	San Salvador	Delgado	187	100.00	Honduras	Intibucá	Camasca	620	100.00	Guatemala	Quiché	San Antonio Ilotenango	990	100.00
El Salvador	San Salvador	El Paisnal	188	66.32	Honduras	Intibucá	Colomoncagua	621	100.00	Guatemala	Quiché	San Bartolomé Jocotenango	991	85.83
El Salvador	San Salvador	Guazapa	189	96.04	Honduras	Intibucá	Concepción	622	100.00	Guatemala	Quiché	San Pedro Jocopilas	993	100.00
El Salvador	San Salvador	Ilopango	190	100.00	Honduras	Intibucá	Dolores	623	100.00	Guatemala	Quiché	Santa Cruz del Quiché	994	100.00
El Salvador	San Salvador	Mejicanos	191	100.00	Honduras	Intibucá	Intibucá	624	99.99	Guatemala	Quiché	Zacualpa	996	98.31
El Salvador	San Salvador	Nejapa	192	100.00	Honduras	Intibucá	Jesús de Otoro	625	56.10	Guatemala	Sacatepéquez	Alotenango	1006	100.00
El Salvador	San Salvador	Panchimalco	193	91.88	Honduras	Intibucá	La Esperanza	626	100.00	Guatemala	Sacatepéquez	Antigua Guatemala	1007	100.00
El Salvador	San Salvador	Rosario de Mora	194	96.30	Honduras	Intibucá	Magdalena	627	100.00	Guatemala	Sacatepéquez	Ciudad Vieja	1008	100.00
El Salvador	San Salvador	San Marcos	195	100.00	Honduras	Intibucá	Masaguara	628	99.90	Guatemala	Sacatepéquez	Jocotenango	1009	100.00
El Salvador	San Salvador	San Martín	196	100.00	Honduras	Intibucá	San Antonio	629	100.00	Guatemala	Sacatepéquez	Magdalena Milpas Altas	1010	100.00
El Salvador	San Salvador	San Salvador	197	100.00	Honduras	Intibucá	San Francisco de Opalaca	630	92.38	Guatemala	Sacatepéquez	Pastores	1011	100.00
El Salvador	San Salvador	Santiago Texacuangos	198	100.00	Honduras	Intibucá	San Isidro	631	100.00	Guatemala	Sacatepéquez	San Antonio Aguas Calientes	1012	100.00
El Salvador	San Salvador	Santo Tomás	199	100.00	Honduras	Intibucá	San Juan	632	100.00	Guatemala	Sacatepéquez	San Bartolomé Milpas Altas	1013	100.00
El Salvador	San Salvador	Soyapango	200	100.00	Honduras	Intibucá	San Marcos de la Sierra	633	100.00	Guatemala	Sacatepéquez	San Lucas Sacatepéquez	1014	100.00
El Salvador	San Salvador	Tonacatepeque	201	100.00	Honduras	Intibucá	San Miguelito	634	100.00	Guatemala	Sacatepéquez	San Miguel Dueñas	1015	100.00
El Salvador	San Vicente	Apastepeque	202	100.00	Honduras	Intibucá	Santa Lucía	635	100.00	Guatemala	Sacatepéquez	Santa Catarina Barahona	1016	100.00
El Salvador	San Vicente	Guadalupe	203	100.00	Honduras	Intibucá	Yamaranguila	636	100.00	Guatemala	Sacatepéquez	Santa Lucía Milpas Altas	1017	100.00

Panamá	Los Santos	Pocrí	311	64.96	Honduras	Olancho	El Rosario	704	45.60	Costa Rica	Cartago	La Unión	1141	57.45
Nicaragua	Boaco	San José de los Remates	357	55.91	Honduras	Olancho	Gualaco	706	48.53	Costa Rica	Guanacaste	Bagaces	1146	39.18
Nicaragua	Boaco	San Lorenzo	358	61.62	Honduras	Olancho	Guarizama	707	76.56	Costa Rica	Guanacaste	Carrillo	1148	60.02
Nicaragua	Boaco	Santa Lucía	359	92.04	Honduras	Olancho	Guata	708	89.76	Costa Rica	Guanacaste	Hojancha	1149	98.82
Nicaragua	Boaco	Teustepe	360	98.82	Honduras	Olancho	Guayape	709	100.00	Costa Rica	Guanacaste	La Cruz	1150	72.46
Nicaragua	Carazo	Diriamba	361	76.66	Honduras	Olancho	Jano	710	75.62	Costa Rica	Guanacaste	Liberia	1151	52.65
Nicaragua	Carazo	Dolores	362	92.65	Honduras	Olancho	Juticalpa	711	86.11	Costa Rica	Guanacaste	Nandayure	1152	89.80
Nicaragua	Carazo	El Rosario	363	100.00	Honduras	Olancho	Manguillile	713	70.22	Costa Rica	Guanacaste	Nicoya	1153	89.64
Nicaragua	Carazo	Jinotepe	364	83.91	Honduras	Olancho	Manto	714	97.03	Costa Rica	Guanacaste	Santa Cruz	1154	77.35
Nicaragua	Carazo	La Conquista	365	83.09	Honduras	Olancho	Patuca	715	57.72	Costa Rica	Heredia	Belén	1157	100.00
Nicaragua	Carazo	La Paz de Carazo	366	100.00	Honduras	Olancho	Salamá	716	96.10	Costa Rica	Heredia	Flores	1158	81.19
Nicaragua	Carazo	San Marcos	367	100.00	Honduras	Olancho	San Francisco de Becerra	718	81.18	Costa Rica	Puntarenas	Esparza	1176	89.75
Nicaragua	Chinandega	Chinandega	369	75.25	Honduras	Olancho	San Francisco de la Paz	719	97.54	Costa Rica	Puntarenas	Puntarenas	1182	59.63
Nicaragua	Chinandega	Cinco Pinos	370	99.66	Honduras	Olancho	Santa María del Real	720	86.28	Costa Rica	San José	Alajuelita	1184	59.68
Nicaragua	Chinandega	El Realejo	372	58.89	Honduras	Olancho	Silca	721	100.00	Costa Rica	San José	Desamparados	1187	41.51
Nicaragua	Chinandega	El Viejo	373	59.37	Honduras	Olancho	Yocón	722	52.29	Costa Rica	San José	Escazú	1189	90.82
Nicaragua	Chinandega	Posoltega	374	53.25	Honduras	Santa Bárbara	Arada	723	84.53	Costa Rica	San José	Mora	1193	96.28
Nicaragua	Chinandega	San Francisco del Norte	376	96.48	Honduras	Santa Bárbara	Atima	724	100.00	Costa Rica	San José	San José	1197	54.00
Nicaragua	Chinandega	San Pedro del Norte	377	97.69	Honduras	Santa Bárbara	El Nispero	730	61.87	Costa Rica	San José	Santa Ana	1198	95.97
Nicaragua	Chinandega	Villanueva	379	40.85	Honduras	Santa Bárbara	Macuelizo	734	79.94	Costa Rica	San José	Tibás	1200	68.37
Nicaragua	Chontales	Acoyapa	380	35.11	Honduras	Santa Bárbara	Naranjito	735	100.00	Costa Rica	San José	Turrubares	1201	62.86
Nicaragua	Chontales	Comalapa	381	81.60	Honduras	Santa Bárbara	Nuevo Celilac	737	96.77					
Nicaragua	Chontales	Juigalpa	382	61.28	Honduras	Santa Bárbara	Petosa	738	59.85					

Anexo 8: Distribución de frecuencias, porcentaje promedio mensual de humedad de suelo en municipios por región.

