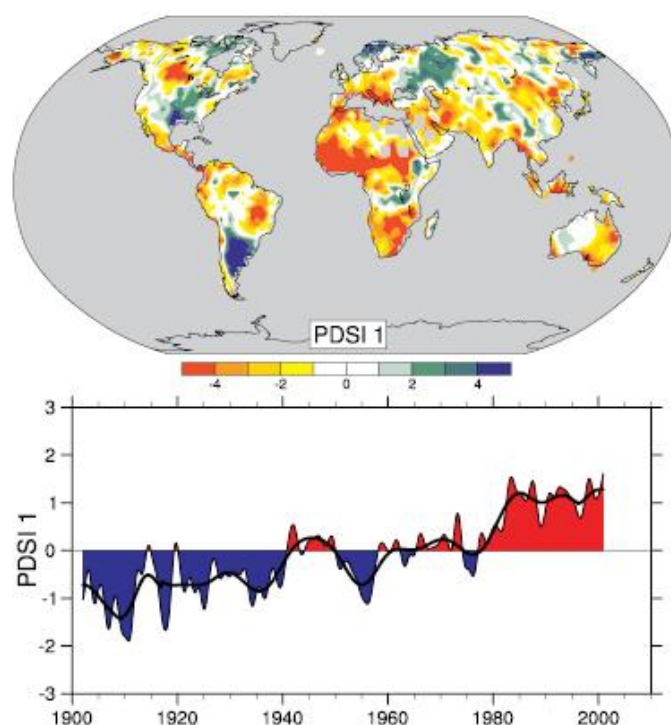


**APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE SEVERIDAD
DE SEQUÍA DE PALMER, EN EL VALLE
GEOGRÁFICO DEL DEPARTAMENTO DEL
VALLE DEL CAUCA A PARTIR DE
SENSORES REMOTOS**





**APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE SEVERIDAD DE SEQUÍA DE PALMER, EN EL VALLE GEOGRÁFICO
DEL DEPARTAMENTO DEL VALLE DEL CAUCA A PARTIR DE SENSORES REMOTOS**

**DIEGO FERNANDO ROMERO GUERRERO
KEVIN HERNEY MARTINEZ LINARES**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
SANTIAGO DE CALI
2016**



**APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE SEVERIDAD DE SEQUÍA DE PALMER, EN EL VALLE GEOGRÁFICO
DEL DEPARTAMENTO DEL VALLE DEL CAUCA A PARTIR DE SENSORES REMOTOS**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO TOPOGRÁFICO**

**DIEGO FERNANDO ROMERO GUERRERO
KEVIN HERNEY MARTINEZ LINARES**

**DIRECTOR:
FRANCISCO LUIS HERNANDEZ T.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
SANTIAGO DE CALI
2016**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad del Valle para optar al título de Ingeniero Topográfico.

SILVIO GRACIANI

Jurado

RAÚL AGUIRRE

Jurado

Santiago de Cali, 15 de Abril de 2012

En primer lugar, dedico este trabajo especialmente a Dios, quien siempre ha estado presente en mi vida. A mis padres Alcindo Martínez y Lilia Linares, por todo el esfuerzo y dedicación que emplearon para que yo pudiera sacar adelante mi carrera. A mi hermano Cristian Ray por ser un ejemplo para mí durante mucho tiempo. A mi novia Mary Luz Murillo por ser tan hermosa e incondicional y a mi bebé que viene en camino, que lo amo con todas mis fuerzas.

Dedico este trabajo a mis padres Omar Romero y Mireya Guerrero, por todo el esfuerzo y apoyo que me brindaron para formarme tanto en lo profesional como en lo personal, a mis hermanos y mi novia Anyi Ramírez quien fue una persona muy importante para culminar esta etapa en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al profesor Francisco Luis Hernández por sus consejos y por su guía en la realización de este proyecto. Al señor Yurisbel Gallardo Ballat, quién nos brindó información en un momento clave de este trabajo. A la corporación Cenicaña, gracias por su excelente y eficaz atención. A la Universidad del Valle, por brindarnos las herramientas y el conocimiento necesario, tanto para este trabajo, como para nuestra vida laboral. A todos y a cada una de las personas que estuvieron presentes a lo largo de la elaboración de este proyecto, mil gracias.

Tabla de Contenido

0.	RESUMEN	14
1.	INTRODUCCIÓN.....	14
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
3.	JUSTIFICACIÓN	16
4.	OBJETIVOS.....	16
4.1.	Objetivo general.....	16
4.2.	Objetivo Específico	16
5.	MARCO TEORICO.....	17
5.1.	Marco Conceptual.....	17
5.1.1.	Teledetección.....	17
5.1.2.	La sequía.....	17
5.1.3.	Índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP).....	17
5.1.4.	Evapotranspiración potencial.....	17
5.1.5.	Radiación solar.....	18
5.1.6.	Humedad relativa.....	18
5.1.7.	Temperatura.....	18
5.1.8.	Recarga potencial.....	18
5.1.9.	Pérdida potencial.....	18
5.1.10.	Escurrecimiento potencial.....	18
5.1.11.	Precipitación.....	18
5.2.	Marco Metodológico.....	19
5.2.1.	Evapotranspiración Potencial	19
5.2.2.	Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo o agua útil	20
5.2.3.	Cálculo del balance hídrico del suelo.....	21
5.2.4.	Pérdida, Recarga y Contenido total de humedad del suelo	23
5.2.5.	Escurrecimiento	24
5.2.6.	Evapotranspiración Real	24
5.2.7.	Determinación de coeficientes.....	24
5.2.8.	Precipitación ajustada	26

5.2.9.	Deficiencias hídricas	26
5.2.10.	Factor climático	27
5.2.11.	Índice de humedad anormal	27
5.2.12.	Índice de Sequía de Palmer	28
5.3.	Marco Referencial.	28
6.	METODOLOGIA	32
6.1.	Materiales	32
6.1.1.	Zona estudio.....	32
6.1.2.	Obtención de información.....	33
6.2.	Preprocesamiento	34
6.2.1.	Georreferenciación.....	34
6.2.2.	Reproyección.....	35
6.2.3.	Recorte de zona estudio	36
6.2.4.	Remuestreo	37
6.2.5.	Selección de estaciones excluidas por vacíos	37
6.3.	Procesamiento	38
6.3.1.	Cálculo evapotranspiración potencial	38
6.3.2.	Cálculo de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo o agua útil.....	38
6.3.3.	Cálculo del balance hídrico.....	38
6.3.4.	Cálculo de pérdidas, recargas y contenido de humedad en el suelo.	38
6.3.5.	Cálculo del escurrimiento	39
6.3.6.	Cálculo de evapotranspiración real	39
6.3.7.	Cálculo de coeficientes	39
6.3.8.	Cálculo de precipitación ajustada.....	39
6.3.9.	Cálculo de deficiencias hídricas	39
6.3.10.	Cálculo del factor climático	39
6.3.11.	Cálculo del índice de humedad anormal	40
6.3.12.	Cálculo del índice de sequía de Palmer	40
6.4.	Validación.....	40
7.	RESULTADOS	43

7.1.	Validación.....	68
8.	DISCUSIÓN	74
9.	CONCLUSIONES	76
10.	RECOMENDACIONES	78
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	79

Lista de Tablas

Tabla 1.Valores de capacidad de campo, punto de marchitez permanente y peso específico aparente.....	20
Tabla 2.Evaluación del Índice de Severidad de la Sequía de Palmer	28
Tabla 3. Estaciones excluidas por vacíos en información.	37
Tabla 4.Estaciones RMA utilizadas para validación	40
Tabla 5.Datos de temperatura promedio mensual en °C para el año 2012 estaciones RMA	41
Tabla 6.Datos de precipitación promedio mensual en pulgadas para el año 2012 estaciones RMA	42
Tabla 7. Cálculo del AWC para cultivos de Caña.....	43
Tabla 8. Resultados puntuales estación Viterbo	44
Tabla 9.Resultados puntuales estación La Paila.	48
Tabla 10. Resultados puntuales estación Rio Frio	50
Tabla 11. Resultados puntuales estación Yotoco	52
Tabla 12.Resultados puntuales estación Amaime	53
Tabla 13.Resultados puntuales estación San Marcos.....	55
Tabla 14. Resultados puntuales estación Rozo	56
Tabla 15. Resultados puntuales estación El Tiple.....	58
Tabla 16. Resultados puntuales estación Ortigal	59
Tabla 17. Resultados puntuales estación Jamundí.....	61
Tabla 18. Resultados puntuales estación Candelaria.	63
Tabla 19. Resultados puntuales estación Corinto.	64
Tabla 20. Resultados puntuales estación Guachinté.....	65
Tabla 21. Escala de interpretación del Coeficiente de Correlación de Pearson.....	69
Tabla 22.Coeficiente de correlación de variables en estación La Paila.....	69
Tabla 23.Coeficiente de correlación de variables en estación Rio Frío	69
Tabla 24.Coeficiente de correlación de variables en estación Yotoco.....	69
Tabla 25.Coeficiente de correlación de variables en estación Amaime	70
Tabla 26.Coeficiente de correlación de variables en estación San Marcos	70
Tabla 27.Coeficiente de correlación de variables en estación Rozo.....	70
Tabla 28.Coeficiente de correlación de variables en estación El Tiple	71
Tabla 29.Coeficiente de correlación de variables en estación Ortigal	71
Tabla 30.Coeficiente de correlación de variables en estación Jamundí	71
Tabla 31.Coeficiente de correlación de variables en estación Candelaria.....	71
Tabla 32.Coeficiente de correlación de variables en estación Corinto.....	72
Tabla 33.Coeficiente de correlación de variables en estación Guachinté	72

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa esquemático de la ubicación del valle geográfico del Río Cauca en el Departamento del Valle del Cauca.	32
Figura 2. Distribución en tiles del globo terráqueo. Zona de estudio enmarcada en rojo.	33
Figura 3. Script de proyectar raster.	35
Figura 4. Script de Recorte.	36
Figura 5. Comparación de variables estación Viterbo.	46
Figura 6. Zonas con datos no confiables.	48
Figura 7. Comparación de variables estación La Paila.	49
Figura 8. Comparación de variables estación Rio Frio.	51
Figura 9. Comparación de variables estación Yotoco.	53
Figura 10. Comparación de variables estación Amaime.	54
Figura 11. Comparación de variables estación San Marcos.	56
Figura 12. Gráfico de comparación de variables estación Rozo.	57
Figura 13. Gráfico de comparación de variables estación El Tiple.	59
Figura 14. Comparación de variables estación Ortigal.	61
Figura 15. Comparación de variables estación Jamundí.	62
Figura 16. Comparación de variables estación Candelaria.	63
Figura 17. Comparación de variables estación Corinto.	65
Figura 18. Comparación de variables estación Guachinté.	66
Figura 19. Correlaciones más altas del IDSP en sensores vs estaciones.	73

Lista de Anexos

Anexo 1. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo para cultivos de caña.	85
Anexo 2. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de enero temporalidad día en el año 2012.	85
Anexo 3. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de enero temporalidad promedio en el año 2012.....	85
Anexo 4. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de enero temporalidad noche en el año 2012.	85
Anexo 5. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Febrero temporalidad día en el año 2012.	86
Anexo 6. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Febrero temporalidad promedio en el año 2012.....	86
Anexo 7. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Febrero temporalidad noche en el año 2012.	86
Anexo 8. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Marzo temporalidad día en el año 2012.	86
Anexo 9. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Marzo temporalidad promedio en el año 2012.....	87
Anexo 10. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Marzo temporalidad noche en el año 2012.	87
Anexo 11. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Abril temporalidad día en el año 2012.	87
Anexo 12. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Abril temporalidad promedio en el año 2012.....	87
Anexo 13. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Abril temporalidad noche en el año 2012.	88
Anexo 14. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Mayo temporalidad día en el año 2012.	88
Anexo 15. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Mayo temporalidad promedio en el año 2012.....	88
Anexo 16. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Mayo temporalidad noche en el año 2012.	88
Anexo 17. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Junio temporalidad día en el año 2012.	89
Anexo 18. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Junio temporalidad promedio en el año 2012.....	89

Anexo 19. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Junio temporalidad noche en el año 2012.	89
Anexo 20. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Julio temporalidad día en el año 2012.	89
Anexo 21. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Julio temporalidad promedio en el año 2012.....	90
Anexo 22. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Julio temporalidad noche en el año 2012.	90
Anexo 23. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Agosto temporalidad día en el año 2012.	90
Anexo 24. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Agosto temporalidad promedio en el año 2012.....	90
Anexo 25. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Agosto temporalidad noche en el año 2012.	91
Anexo 26. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Septiembre temporalidad día en el año 2012.	91
Anexo 27. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Septiembre temporalidad promedio en el año 2012.	91
Anexo 28. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Septiembre temporalidad noche en el año 2012.	91
Anexo 29. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Octubre temporalidad día en el año 2012.	92
Anexo 30. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Octubre temporalidad promedio en el año 2012.....	92
Anexo 31. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Octubre temporalidad noche en el año 2012.	92
Anexo 32. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Noviembre temporalidad día en el año 2012.....	92
Anexo 33. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Noviembre temporalidad promedio en el año 2012.	93
Anexo 34. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Noviembre temporalidad noche en el año 2012.....	93
Anexo 35. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Diciembre temporalidad día en el año 2012.	93
Anexo 36. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Diciembre temporalidad promedio en el año 2012.	93
Anexo 37. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Diciembre temporalidad noche en el año 2012.	94

0. RESUMEN

El fenómeno de la sequía se puede definir como un periodo de tiempo con situaciones bajas de precipitación, causante de condiciones meteorológicas prolongadas secas perjudicando el ciclo hidrológico (OMM, 1992). En este estudio se analizó el comportamiento espacio temporal y se generó cartografía de la severidad de la sequía para en el valle geográfico del departamento del Valle del Cauca aplicando el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (IDSP) en el año 2012, mediante la utilización de la tecnología de sensores remotos. Los datos de entrada utilizados en esta investigación fueron las imágenes de temperatura del sensor Modis, imágenes de precipitación TRMM de la Nasa y un mapa digital de textura del suelo proporcionado por Cenicaña. Los resultados fueron validados a partir de datos de estaciones meteorológicas de Cenicaña. A manera general, se obtuvo una correlación promedio de 0,63 con respecto a los datos de validación. Los mapas generados en este estudio permiten conocer el valor del IDSP en cada pixel, por lo que ésta metodología es muy eficaz para evaluar a manera local las zonas más afectadas por una sequía.

Palabras clave: Teledetección, Palmer, Sequía, Modis, TRMM.

1. INTRODUCCIÓN

La sequía se puede definir como un periodo de tiempo con situaciones bajas de precipitación, causante de condiciones meteorológicas prolongadas secas perjudicando el ciclo hidrológico (OMM, 1992). Por lo que es importante seguir un monitoreo que permita espacializar la severidad de la sequía.

Se pretende analizar el comportamiento espacio temporal y generación cartográfica de la severidad de la sequía para el departamento del Valle del Cauca aplicando el índice de severidad de sequía de Palmer, mediante la utilización de la tecnología de sensores remotos ya que a partir de este se obtienen los datos para el procesamiento, como la precipitación y temperatura.

El método de Palmer es el más utilizado en los Estados Unidos para determinar la duración, extensión e intensidad espacial de la sequía (Palmer, 1965) así como para determinar zonas donde hay extrema humedad.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo a lo reportado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2013) la sequía es el peligro natural más destructivo del mundo, causando la muerte y el desplazamiento de más personas que los ciclones, inundaciones y terremotos juntos. Sin embargo, aunque se prevé que las sequías aumenten en frecuencia, superficie e intensidad debido al cambio climático, en la mayor parte del mundo se carece de políticas eficaces sobre el amortiguamiento del impacto de la sequía. Para el año 2017, dice la ONU (BBC

NEWS, 2009), cerca de 70% de la población global tendrá problemas para acceder al agua dulce. Y para el 2025, aproximadamente el 40% de la población vivirá en regiones donde el agua escasea.

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), el fuerte verano que se ha sentido en Colombia en el 2012, y las grandes sequías, son sólo un pequeño abrebocas de las altas temperaturas que se aproximan, debido al fenómeno de El niño (Revista Hechos y Crónicas, 2013). Así mismo, hay ocho departamentos que enfrentan una grave crisis por la sequía en Colombia, se trata de Huila, Tolima, Valle del Cauca, Cauca, Boyacá, Cundinamarca, Norte de Santander y Nariño. Situaciones como estas se presentan debido a la falta de políticas medioambientales, afirma Manuel Rodríguez Becerra, experto en medio ambiente y ex ministro de estado, ya que en los últimos 10 años ha habido un declive muy fuerte en todos los programas de protección ambiental (Noticias Caracol, 2013).

Ahora bien, para el departamento del Valle del Cauca la Secretaría de Gobierno emitió una circular a los 42 Alcaldes de los municipios de la región, en la que pide implementar planes de contingencia, con el propósito de enfrentar los riesgos de incendios forestales y desabastecimiento de agua (Diario ADN, 2013).

Existen cambios importantes en el régimen hidrológico, con una reducción de las precipitaciones de hasta 30%, principalmente en la región andina, lo cual incrementará el déficit hídrico de algunas cuencas abastecedoras de acueductos, distritos de riego y embalses hidroeléctricos (Contraloría Cali, 2010). Álvaro Amaya, director de Cenicaña, explicó que la producción de caña sí se ha visto afectada por los cambios climáticos de los últimos cuatro años, según el periódico El País (2012).

En Colombia se llevó a cabo un análisis de la variabilidad espacio-temporal mediante el índice estandarizado de precipitación SPI (Zuluaga J., 2009), en el que se estimó las anomalías de la precipitación en el tiempo. Por otra parte, en la región Caribe se implementaron cinco índices (Hurtado G., Cadena M., 2002), a saber: como índices de lluvia se probaron el índice de los deciles y el índice estandarizado; como índices de balance hídrico se probaron el índice de palmer (X), el índice de anomalía de humedad (Z) y el índice de disponibilidad hídrica (IDH).

Para el departamento del Valle del Cauca no se ha implementado un método que permita identificar la severidad de la sequía a partir de tecnología, como lo son los Sensores Remotos. Los sensores remotos permiten una mejor comprensión del comportamiento de las sequías cuando se presentan en una región determinada. Esta iniciativa pretende aplicar un método basado en el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (IDSP) desarrollado para medir la intensidad, duración y extensión espacial de la sequía (Palmer, 1956).

Es importante la aplicación del IDSP en el departamento del Valle del Cauca, debido a que este índice no solamente evalúa las temporadas de sequía, sino también las temporadas de humedad. El índice es un algoritmo de la humedad del suelo calibrado para regiones relativamente homogéneas, microclimas o climas extremos, ya que si se aplica en otras condiciones puede conducir a errores. Por tal razón se requiere implementar en una zona

homogénea con lo cual se determinó al valle geográfico del Valle del Cauca como una zona viable a la aplicación del índice.

3. JUSTIFICACIÓN

Es importante llevar un monitoreo climatológico a nivel mundial por lo que las naciones han buscado la forma de implementar métodos que caractericen y clasifiquen la sequía de manera constante.

Existen muchos métodos para la caracterización de la sequía de una manera superficial sin embargo ninguno refleja completamente todas sus características (Hurtado G., Cadena M., 2002). Por esta razón, se propone implementar el (IDSP), ya que este método es mejor para fines de diseño y planes de prevención y contingencia a corto plazo con respecto a otros métodos desarrollados (Crespo G., 2005).

Colombia hace parte del programa de lucha contra la desertificación y la sequía determinada en la CUMBRE PARA LA TIERRA DE RIO DE JANEIRO realizada en 1992 por lo tanto Colombia ha iniciado el plan de acción nacional de lucha contra la desertificación de la sequía (PAN) el que se espera contribuya en la prevención, mitigación, corrección y compensación de los factores causantes de la degradación de tierras, desertificación y sequias las cuales son acogidas a escala nacional, regional y local (UNCCD, 2007).

A partir del desarrollo de esta metodología se obtendrá cartografía referente a la temperatura, la precipitación, evapotranspiración, índice de humedad anormal, y el índice de Palmer, así como estadísticas que muestren el comportamiento de dichos aspectos a través del tiempo.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Implementar el índice de severidad de sequía de palmer, en el valle geográfico del departamento del Valle del Cauca a partir de Sensores Remotos.

4.2. Objetivo Específico

Evaluar el comportamiento espacio temporal de la sequía para el año 2012.

Generar un modelo cartográfico del índice de severidad de sequía de Palmer.

Validar los resultados obtenidos con la metodología implementada con datos de estaciones meteorológicas con la finalidad aplicar los métodos planteados en estudios posteriores.

5. MARCO TEORICO

5.1. Marco Conceptual.

5.1.1. Teledetección.

Es la técnica de adquisición y posterior tratamiento de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, en virtud de la interacción electromagnética existente entre la tierra y el sensor, en la que la fuente de radiación es el sol. La tecnología de teledetección se está implementando para muchos campos de investigación donde los datos en situ no arrojarían la información necesaria, para lo que se ha convertido en la herramienta más prometedora para la vigilancia a gran escala de la sequía (Li D., Liu Y., Chen Y., 2011).

5.1.2. La sequía.

Fenómeno que se produce naturalmente cuando las lluvias han sido considerablemente inferiores a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas de producción de recursos de tierras (Convención de las Naciones Unidas Contra la Desertificación en Países Afectados por Sequía Grave y Desertificación, 2004). También se puede definir como un periodo de tiempo con situaciones bajas de precipitación, causante de condiciones meteorológicas prolongadas secas perjudicando el ciclo hidrológico (OMM, 1992). Es por esto que los expertos han buscado la forma de monitorear la sequía, en cuanto su inicio, duración, y fin de ella misma implementando índices de severidad de sequía como lo es el de Palmer (IDSP).

5.1.3. Índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP).

Este es el índice más utilizado en Estados Unidos para determinar la duración, extensión e intensidad espacial de la sequía (Palmer 1965). En este método se relacionan la temperatura del aire, humedad de suelo local, evapotranspiración, las recargas potenciales de agua, sus pérdidas y escurrimiento para la determinación de un índice donde se obtienen valores de sequía extrema desde -4.0 y condiciones de extrema húmeda hasta +4.0.

5.1.4. Evapotranspiración potencial.

La evapotranspiración fundamentalmente tiene la misma base de la evaporación pero con la acepción de que se tienen en cuenta la evaporación o pérdida de agua por los seres vivos, en especial las plantas (Vega L., 2005). La cantidad de evapotranspiración puede variar día a día dependiendo de factores ambientales tales como la radiación solar, humedad relativa, temperatura, viento que actúen sobre la misma.

5.1.5. Radiación solar.

Es la cantidad de energía radiante y luz visible emitida por el sol. Por lo que la luz influencia la apertura y cierre de las estomas¹ generando el proceso de evapotranspiración.

5.1.6. Humedad relativa.

Es la relación de la humedad absoluta del aire (la real) con la humedad saturada (condiciones de niebla, vapor) en términos de porcentaje.

5.1.7. Temperatura.

Propiedad física que se refiere a las nociones comunes de calor o ausencia de calor. Es una de las magnitudes más utilizadas para describir el estado de la Atmósfera. La temperatura del aire varía entre el día y la noche, y también entre una ubicación geográfica y otra; se puede llegar a estar bajo los 0 °C y superar los 40 °C en diferentes regiones del planeta.

5.1.8. Recarga potencial.

Se puede definir como la entrada de agua a zonas donde la saturación de la misma pasa a ser reservorio. Puede ser de tipo natural debido a ríos, lagos, reservorios y demás cuerpos de agua o artificial como lo son las irrigaciones, fugas de embalses o tuberías (Vélez M., 2010).

5.1.9. Pérdida potencial.

Se le asume a la cantidad de fluidos perdidos en el suelo, cuando la capacidad de saturación llega a su límite inferior. Cantidad de evapotranspiración que puede ocurrir si la precipitación no escasea durante el mes.

5.1.10. Esguerrimiento potencial.

Es el recorrido de forma natural por donde fluye el agua precipitada en una cuenca para ser depositada en el mar o laguna (UNAM 2010).

5.1.11. Precipitación.

Es el principal elemento para el esguerrimiento y se puede dar en forma líquida o sólida (lluvia o nieve), en otras palabras, es el agua o hielo que cae (UNAM, 2010).

¹ Estomas: son la boca de las hojas, las estomas se abren más a la presencia del sol lo que inicia la salida de vapor de agua. (C Gonzales 2010).

5.2. Marco Metodológico

Este capítulo hace referencia a todos los modelos empleados para el cálculo del IDSP tales como la evapotranspiración, escurrimiento, pérdida, recarga, precipitación ajustada, índice de humedad anormal, etc., planteando además que se espera obtener con dichos modelos.

Inicialmente se debe afirmar que el IDSP parte de un balance de humedad mensual, que para ello emplea los registros de precipitación y temperatura, además considera la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo de la siguiente manera:

- a) Establece dos capas de suelo sin definir su profundidad y sólo las propiedades hídricas; es decir, Palmer asume que la primera capa (superficial) del suelo es capaz de almacenar hasta una pulgada de agua (25 mm) y lo considera como valor constante para todos los casos; en tanto que la segunda capa (sub-superficial) puede almacenar toda la capacidad potencial del suelo, menos 25 mm.
- b) La humedad no puede ser removida de (o recargada a) la segunda capa, hasta que la humedad de la primera capa haya sido removida (o recargada) por completo; es decir no hay remoción de humedad de la segunda capa si no se ha agotado la humedad en la primera y no hay recarga de humedad en la segunda si no se ha recargado completamente la primera.

5.2.1. Evapotranspiración Potencial

Como base inicial para el cálculo del IDSP está la Evapotranspiración Potencial (ETP). Para ello se utiliza el método de Thornthwaite W. (1948) que está en función de la temperatura media del aire con un factor de corrección que tenga en cuenta el número de días del mes y horas de luz de cada día, en función de la latitud (Almorox J., 2010). Thornthwaite comprobó que la evapotranspiración es proporcional a la temperatura media afectada de un coeficiente exponencial. La fórmula es:

$$ETP = f * 1,6 \left(10 * \frac{T}{I} \right)^a \quad (1)$$

En donde ETP es la evapotranspiración potencial en un mes en cm, T es la temperatura media del aire de °C, f es un factor de corrección por latitud y se obtiene de la siguiente manera:

$$f = \left(\frac{N_i}{12} \right) \quad (2)$$

Ni es la duración astronómica del día (horas sol) corregido por la latitud. El valor a es una constante del lugar que se determina por la siguiente ecuación:

$$a = 0,000000675 I^3 - 0,0000771 I^2 + 0,01792 I + 0,49239 \quad (3)$$

I es un índice de calor que es la suma de los valores i la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$I = \sum_{mes=1}^{12} i_{mes} ; i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514} \quad (4)$$

5.2.2. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo o agua útil

En primera instancia, se debe obtener la capacidad total de almacenamiento de agua en el suelo (AWC) en milímetros, es decir, el agua útil en las dos capas, mediante el siguiente cálculo (Luro P., 1982):

$$AWC = \frac{CC - PMP}{100} * PEA * PrR \quad (5)$$

En donde CC es la capacidad de campo, que es la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener, PMP es el punto de marchitez permanente que indica la cantidad mínima de agua que puede contener un suelo para que no se marchiten y no se mueran las plantas que se cultivan en él; PEA es el peso específico aparente que corresponde al peso que tiene una unidad de volumen de sólido en forma de partícula de tal manera que en él está incluido el volumen que resulta de la suma de los volúmenes de cada una de las partículas y el volumen de todos los espacios libres que quedan entre las partículas y los límites físicos que imponemos a la unidad de volumen; PrR es la profundidad de las raíces. A continuación se ofrecen los valores logrados por experiencias para cada tipo de suelo de los caracteres específicos antes mencionados.

Tabla 1. Valores de capacidad de campo, punto de marchitez permanente y peso específico aparente.

TIPO DE SUELO	CC	PMP	PEA
Fina (arcilla)	35	17	1,25
Media (franco)	22	10	1,4
Gruesa (arenoso)	9	4	1,65

Ahora bien, como la zona de estudio es bastante amplia y existen diversos tipos de plantas, se decidió aplicarlo solamente a plantaciones de caña de azúcar, debido a que ésta es la que ocupa mayor extensión en toda la zona del valle geográfico. Por tanto, se tomará como el valor la profundidad media de las raíces del cultivo de caña de azúcar que es igual a 50 centímetros para todas las texturas.

5.2.3. Cálculo del balance hídrico del suelo

Una vez determinada la ETP, se presentan dos condiciones iniciales del balance de humedad: cuando la precipitación (p) es menor que la ETP y cuando la precipitación (p) es mayor que la ETP (Crespo G., 2005). Para el primer caso, se considera que la humedad existente no es suficiente para satisfacer la demanda de la ETP, generando un déficit de humedad. Por tanto no hay posibilidades de escurrimiento ni de recarga de humedad.

Para la segunda situación se pueden generar a su vez dos condiciones: que el superávit de humedad solo cubra las necesidades de ETP y recarga de humedad de una o dos capas del suelo por lo que no habría escurrimiento o que el superávit de humedad sea suficiente para cubrir las necesidades de ETP, de recarga de humedad hasta llevar a capacidad de campo a todo el suelo y exista un remanente para escurrimiento.

5.2.3.1. Cuando la precipitación (p) es menor a la evapotranspiración (ETP)

Condición: $[p - ETP \leq 0]$

5.2.3.1.1. Primera capa

Cuando la precipitación es menor que la ETP, no hay recarga (RSS) ni escurrimiento (RO). Si la demanda evapotranspirativa ($p - ETP$) es mayor o igual que el contenido de humedad del suelo (Ss), se pierde toda la humedad contenida.

$$Ls = SsAnt \quad (6)$$

Donde Ls es la cantidad de humedad perdida por la primera capa, para un mes, y $SsAnt$ es el contenido de humedad del suelo del mes anterior. Si el suelo contiene más humedad que la demandada por ($p - ETP$), se pierde solo la humedad demandada.

$$Ls = p - ETP \quad (7)$$

En ambas condiciones, el contenido de humedad del suelo al final del mes es igual a la del mes anterior menos la que se haya perdido en el mes actual.

$$Ss = SsAnt - Ls \quad (8)$$

5.2.3.1.2. Segunda capa

Si el contenido de humedad de la primera capa al final de mes es mayor que cero ($Ss > 0$), la pérdida de humedad de la segunda capa es cero ($Lu = 0$) y continúa el mismo nivel de humedad del mes anterior ($Su = SsAnt$). Caso contrario la demanda de pérdida de la segunda capa es

proporcional a lo que resta potencialmente por evaporar en la primera capa y al nivel de saturación de la segunda capa ($SsAnt/AWC$), de la siguiente manera:

$$((ETP - p) - Ls) * \left(\frac{SuAnt}{AWC}\right) \geq SuAnt \quad (9)$$

Si la demanda es mayor o igual que la humedad disponible en la segunda capa, la pérdida de humedad es todo el contenido de segunda capa ($Lu=SsAnt$). De lo contrario, la pérdida de humedad (Lu) es igual a la demanda de pérdida que resta potencialmente por evaporar:

$$Lu = ((ETP - p) - Ls) * \left(\frac{SuAnt}{AWC}\right) \quad (10)$$

En ambas condiciones, al final de mes el contenido de humedad del suelo es la del mes anterior menos la que se haya perdido:

$$Su = SuAnt - Lu \quad (11)$$

5.2.3.2. Cuando la precipitación es mayor o igual que la evapotranspiración

Condición: $[p-ETP \geq 0]$

5.2.3.2.1. Primera capa

Cuando la precipitación es mayor que la demanda evapotranspirativa, no hay pérdida de humedad de la capa superficial ($Ls=0$).

$$(AWCs - SsAnt) \leq (p - ETP) \quad (12)$$

Donde $AWCs$ es la capacidad máxima de almacenamiento de humedad en la primera capa, se asume que es igual a 25 mm. Si el espacio disponible para recarga de humedad es menor o igual que la humedad, la recarga solo será equivalente a dicho espacio.

$$Rs = AWCs - SsAnt \quad (13)$$

En donde Rs es la cantidad de humedad recargada en la segunda capa, para un mes. En caso contrario se recargará toda la oferta de humedad.

$$Rs = (p - ETP) \quad (14)$$

En ambos casos, al final del mes el contenido de humedad del suelo es la de mes anterior más la que se haya recargado durante el mes corriente:

$$S_s = S_{sAnt} + R_s \quad (15)$$

5.2.3.2.2. Segunda capa

En este caso la pérdida de humedad es cero ($L_u=0$). Se pueden presentar dos situaciones que dependen de la humedad de la primera capa.

$$S_s < AWC_s \quad (16)$$

En primer lugar si el espacio disponible para recarga en la primera capa (AWC_s) es mayor que la humedad a recargar no hay recarga ($R_u=0$). De lo contrario, se pueden presentar dos condiciones:

$$p - ETP - R_s \leq (AWC_u - S_{uAnt}) \quad (17)$$

Donde AWC_u es la capacidad máxima de almacenamiento de humedad en la segunda capa, se asume que es $AWC-25$. Si el espacio disponible para recarga en la segunda capa es mayor que la humedad potencial a recargar, la recarga máxima será la humedad potencial a recargar

$$R_u = p - ETP - R_s \quad (18)$$

De lo contrario, solo se recargará el espacio disponible:

$$R_u = AWC_u - S_{uAnt} \quad (19)$$

En ambos casos, al final del mes el contenido de humedad del suelo es la del mes anterior más la recarga.

$$S_u = S_{uAnt} + R_u \quad (20)$$

5.2.4. Pérdida, Recarga y Contenido total de humedad del suelo

Ahora bien, con estos datos se calcula la estimación de pérdidas, recargas y contenido total de humedad en el suelo a fin de mes (IICA, 1997).

$$L = L_s + L_u \quad (21)$$

$$R = R_s + L_u \quad (22)$$

$$S = S_s + S_u \quad (23)$$

En donde L es la cantidad de agua total perdida del suelo en el mes, R es la recarga total de humedad del suelo en el mes, y S es el contenido total de humedad en el suelo para el mes.

5.2.5. Esguerrimiento

Ahora bien, para determinar la cantidad de agua esguerrida superficialmente para un mes dado (RO), se pueden presentar tres casos:

- Cuando el contenido de humedad del suelo (S) es inferior a la capacidad de almacenamiento del suelo (AWC) a capacidad de campo, $S < AWC$ entonces $RO=0$.
- Si el suelo se lleva a capacidad de campo y se mantiene en ése nivel (AWC), por pérdida de humedad $S=AWC$ y $L>0$, entonces $RO=0$.
- Si el suelo se lleva a CC^2 o se mantiene en tal nivel (AWC), por recarga de humedad $S=AWC$ y $R>0$, entonces:

$$RO = p - ETP + R \quad (24)$$

5.2.6. Evapotranspiración Real

La evapotranspiración real o efectiva (ET) para cualquier situación que haya permitido llevar o mantener el suelo a CC, $S= AWC$:

$$ET = p - R - RO + L \quad (25)$$

5.2.7. Determinación de coeficientes

Hounam (1974), citado por Castillo D. (1988), partió del hecho de que, para climas secos es normal que el valor de la evapotranspiración potencial exceda al valor de la evapotranspiración efectiva o actual y propuso que a partir de los cuatro valores potenciales (ETP, PR, PL y PRO), se obtengan los coeficientes alfa, beta, gama, delta, dependientes del clima del área en cuestión,

² Siendo CC la capacidad de campo, definida como la cantidad de agua retenida en una muestra de suelo después de drenar el exceso de agua de gravedad (GHI) y PMP el punto de marchitez permanente entendido como el valor límite del agua absorbida y por tanto no aprovechable por las raíces (Hurtado G., Cadena M., 2002).

cada coeficiente representa una razón de proporción entre valores actuales respecto a valores potenciales:

5.2.7.1. Coeficiente de evapotranspiración alfa (α)

Teniendo en cuenta la evapotranspiración media mensual actual (ET) y la evapotranspiración media mensual potencial (ETP) del mes i:

$$\alpha_i = \frac{ET_i}{ETP_i} \quad (26)$$

5.2.7.2. Coeficiente de recarga beta (β)

Teniendo en cuenta el promedio de recarga actual (R) y el promedio de recarga potencial (PR) del mes i:

$$\beta_i = \frac{R_i}{PR_i} \quad (27)$$

Este último valor se define como la cantidad de humedad para llevar al suelo a la capacidad de campo igual a:

$$PR_i = AWC - S' \quad (28)$$

5.2.7.3. Coeficiente de escurrimiento gama (γ)

Teniendo en cuenta el promedio de escurrimiento actual (RO) y el promedio de escurrimiento potencial (PRO) del mes i:

$$\gamma_i = \frac{RO_i}{PRO_i} \quad (29)$$

Para este caso ISSP define a PRO como:

$$PRO = AWC - PR = S' \quad (30)$$

5.2.7.4. Coeficiente de pérdidas delta (δ)

Teniendo en cuenta el promedio de pérdida de humedad actual (L) y el promedio de pérdida de humedad potencial (PL) del mes i:

$$\delta_i = \frac{L_i}{PL_i} \quad (31)$$

PL se define como la cantidad de evapotranspiración que puede ocurrir considerando que la precipitación no escasea durante el mes igual a:

$$PL = PLs + PLu \quad (32)$$

Donde:

PLs (Pérdida potencial de la primera capa) = ETP o Ss' o el que resulte menor de ambos.

PLu (Pérdida potencial de la segunda capa) = (ETP - PLs) Su' / AWC

Para todos los casos: i = 1 (enero), 2 (febrero),... 12 (diciembre).

5.2.8. Precipitación ajustada

Con los valores alfa, beta, gama y delta se calcula la precipitación ajustada ($p^{\wedge}$):

$$p^{\wedge} = \alpha ETP + \beta PR + \gamma PRO - \delta PL \quad (33)$$

Se entiende como una aproximación climática de las condiciones existentes, surge de la consideración de que $p^{\wedge}$ ocurre durante un mes en el cual no hay variaciones "anormales" de evapotranspiración, escurrimiento y humedad almacenada en el suelo, acorde a las condiciones climáticas del área en cuestión.

5.2.9. Deficiencias hídricas

$$Dh = p - p^{\wedge} \quad (34)$$

Esta diferencia de precipitación es la que tendría que ocurrir en un mes en particular para satisfacer la ETP, escurrimiento y humedad almacenada consideradas como "normales" para el área en cuestión. Si se consideran las condiciones de humedad específicas del lugar; el valor Dh proporciona una medida del grado al cual el mes fue anormalmente seco o anormalmente húmedo. Con el valor Dh, se obtuvo el promedio de los valores absolutos ($\bar{D}$) de tal valor, donde i es el mes y n es el número de años:

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i - p_i^{\wedge}| \quad (35)$$

5.2.10. Factor climático

Dichas diferencias de precipitaciones obtenidas deben ser transformadas a índices de anomalías. Este índice es definido por Palmer como el producto de la desviación Dh para cada período y un factor ponderado K que es función de las desviaciones promedio en cada período considerado y de la relación de oferta vs demanda (Hurtado G., Cadena M., 2002). Se realizaron los cálculos siguientes para obtener el parámetro K, que es un ajuste al valor del factor climático (Boletta P., 2001):

$$K = \left(\frac{17,67}{\sum_{i=1}^{12} \bar{D}_i K_i'} \right) * K' \quad (36)$$

Donde el factor ponderado K' se obtiene según la Ecuación (37):

$$K' = 1,5 \log_{10} \left[\frac{\left(\left(\frac{ETP+R+RO}{P+L} \right) + 2,8 \right)}{\bar{D}} \right] + 0,5 \quad (37)$$

5.2.11. Índice de humedad anormal

Este índice de anomalía de humedad expresa una desviación relativa del tiempo, de un mes en particular y localidad, respecto a las condiciones de humedad promedio para dicho mes, con este índice es posible hacer comparaciones de espacio y tiempo, entre localidades y entre meses.

$$Z = Dh * K \quad (38)$$

La diferencia en cuanto a duración de diferentes periodos de sequía, determina que la sequía sea clasificada como leve, fuerte o extrema.

De lo anterior se establece que, el índice final de sequía dependerá de la sucesión de aportes individuales Z. Para tal caso se considera que para un período de meses consecutivamente secos, el grado de severidad de la sequía va en aumento de manera gradual, y en función del valor de la “anomalía de humedad”. Es muy importante reconocer si la secuencia de los valores de Z, para una serie de meses, hasta llegar a un valor dado, fue de manera ascendente o descendente, pues de ello dependerá el valor final de Xi.

5.2.12. Índice de Sequía de Palmer

Palmer derivó una ecuación empírica para determinar el valor del índice:

$$Xi = X_{i-1} + \frac{1}{3}Z_i - 0,103(X_{i-1}) \quad (39)$$

Evidentemente para un mes inicial, en un período seco o húmedo no hay mes anterior es decir:

$$Xi = \frac{1}{3}Z_i \quad (40)$$

Xi es el valor del Índice de Severidad de Sequía de Palmer, los valores se distribuyen dentro de la escala de valores expuesta en la siguiente tabla:

Tabla 2. Evaluación del Índice de Severidad de la Sequía de Palmer

Valores de índice	Categorías
>4	Condición húmeda extrema
3 – 3,99	Condición muy húmeda
2 – 2,99	Condición húmeda moderada
1 – 1,99	Condición húmeda suave
0,5 – 0,99	Condición húmeda incipiente
0,49 – -0,49	Condiciones normales
-0,5 – - 0,99	Sequía incipiente
-1 – -1,99	Sequía suave
-2 – -2,99	Sequía moderada
-3 – -3,99	Sequía severa
< -4	Sequía extrema

Fuente: Palmer W.C. (1965): Meteorological drought.

5.3. Marco Referencial.

El fenómeno de la sequía afecta en gran manera sobre la vida humana, ya sea de forma directa o indirecta, como puede ser la pérdida de vidas humanas, pérdidas económicas a corto y a largo plazo, e incluso aumentando la probabilidad de violencia entre comunidades, guerras civiles o guerra entre naciones como se menciona en anteriores investigaciones (UNCCD, FAO, OMM, 2012). Además, debido al cambio climático probablemente se modifiquen los patrones de los fenómenos naturales, por ende es posible que aumente la frecuencia y la gravedad de los fenómenos extremos.

Por otra parte, existen diversas iniciativas tanto nacionales como internacionales, que generan políticas y planes de gestión, de adaptación, de acción y de reducción de riesgos naturales dentro de los cuales la sequía es uno de sus principales objetivos (Campos et al, 2012). Dentro de dichos planes y políticas está la de realizar un control y monitoreo sobre la sequía; para ello es necesario la aplicación de indicadores de sequía que permitan visualizar el comportamiento de la sequía, establecer tendencias y evaluar las zonas que presentan un mayor impacto para priorizar la ayuda en dichas zonas (Ministerio de Ambiente, 2004). Esto acompañado de mapas y cartografía, son una herramienta muy efectiva que facilita el análisis y puede brindar información más precisa sobre la zona que se desea evaluar (OMM, 2006).

Los índices de sequía generalmente usados en estudios a nivel internacional con sus ventajas y desventajas, se encuentran en el documento del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España (MAGRAMA, 2013) sobre indicadores meteorológicos y la investigación desarrollada por Valiente O.M. (2001).

Existen diferentes tipos de indicadores o índices que permiten evaluar la sequía como lo son el IDSP, SPI, PPM, MPPM, etc. unos más complejos que otros dependiendo de las variables de entrada, como por ejemplo, factores climáticos, geología y geomorfología.

El índice de Severidad de Sequía de Palmer (IDSP) evalúa tanto la sequía como la humedad presente en un suelo (United Nations, 2002). Se puede establecer comparaciones entre distintos lugares y entre meses diferentes (Alley, W.M., 1984). Proporciona representaciones en el espacio y en el tiempo de las sequías históricas (Ministerio del Medio Ambiente, 2005). Sin embargo, no tiene en cuenta el caudal de los ríos, ni los niveles de los lagos y embalses, ni otros impactos hidrológicos a largo plazo, ni los efectos humanos sobre el balance de agua, como es el regadío. Además no es muy adecuado para zonas montañosas o con frecuentes cambio climáticos extremos (MAGRAMA, 2013).

El Índice Normalizado de Precipitaciones (SPI) se puede calcular para diferentes periodos de tiempo. Presenta una señal de alerta temprana de la sequía, que ayuda a valorar la intensidad de la misma y el cálculo es menos complejo que el Indicador de Palmer. No obstante, los valores del SPI se basan en unos datos previos, que pueden cambiar y su cálculo está basado únicamente en datos de precipitación (OMM, 2012).

El porcentaje de precipitación media (PPM) posee un cálculo simple. Puede ser calculado incluso para aquellas zonas con poca disponibilidad de información climatológica. Por lo tanto, es un método susceptible de equívocos, puesto que la precipitación media es un número abstracto que no tiene por qué ser equivalente a la mediana, que sí representa el valor o intervalo de mayor frecuencia de la serie, además de presentar la dificultad de establecer los límites a partir de los cuales se establece una situación de sequía (MAGRAMA, 2013).

La metodología de Cuantiles (quintiles, deciles y percentiles) (MPPM) mejora el método de porcentaje de precipitación media, ofreciendo valores más cercanos a la realidad climática del área estudiada. A pesar de eso, la serie de tiempo pluviométrica debe ser larga (como mínimo treinta años y, si es posible, más de cincuenta) para ofrecer resultados fiables y estadísticamente significativos (Valiente O.M., 2001).

La principal desventaja de la mayoría de los índices es que no se utilizan datos suficientes para su cálculo, ya que existen muchas variables que participan en el desarrollo de una sequía, sin mencionar los fenómenos naturales que ocurren en el suelo. No obstante, el tener un índice que aplique todas las variables que contribuyan directa o indirectamente a la sequía, sería un índice demasiado complejo de calcular (Sergio M., Serrano V., 2011). Por ello, en la actualidad existe una cierta confusión entre científicos, gestores y usuarios finales al elegir un índice de sequía concreto para un propósito específico (Sergio M. et al, 2010).

Crespo G. (2005), evaluó la consistencia del diagnóstico que hace el método de Palmer y el índice estandarizado de precipitación, debido a que dichos métodos manejan distintas variables y por ellos es complejo la extrapolación de sus resultados. De esa manera, concluyó que el IDSP es mejor para fines de diseño de planes de prevención y contingencia a corto plazo, respecto al método SPI.

Por otra parte, Vicente J. (2014) desarrolló su tesis de maestría implementando metodologías basadas en los índices de vegetación (IVs) "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI) y del índice "Normalized Difference Water Index" (NDWI) obtenidos con imágenes satelitales del sensor MODIS, en la identificación y monitoreo de sequías en una zona del Noreste Argentino. La eficiencia de los IVs se realizó comparando los resultados con el "Índice de Palmer" (PDSI) desarrollado en tres estaciones meteorológicas. El comportamiento del PDSI en las tres localidades si bien indica una tendencia en el incremento del déficit hídrico en la última década, sugiere, una variabilidad espacial significativa. Esta es una cuestión a analizar debido a que los resultados del PDSI son puntuales y pueden no reflejar el comportamiento de toda la región. Las diferencias de escalas espaciales que tienen el PDSI (puntual) y los IVs (regional) utilizadas, son importantes a la hora de evaluar las similitudes y diferencias de los resultados. En la aplicación realizada en esta tesis, el PDSI se obtuvo para 3 estaciones meteorológicas, cuya cobertura es de 10m aproximadamente, mientras que cada píxel de las imágenes de los IV(s) tienen 1Km². Además de las diferencias espaciales entre ambas metodologías, hay que tener presente que los IV(s) representan un instante de tiempo, mientras que un valor de PDSI, es representativo del mes. Se concluyó que el PDSI es una metodología ampliamente usada en la evaluación de sequías. Sin embargo, la escasa densidad de estaciones meteorológicas y/o con registros suficientemente amplios en el noreste argentino sugiere la necesidad de contar con otras herramientas y/o metodologías que permitan evaluar con mayor detalle la variabilidad espacial del fenómeno.

Se destaca que en este estudio se utilizaron imágenes MODIS cuyos píxeles tienen 1 km². Esto implica que hay píxeles mixtos (por ejemplo, suelo desnudo + suelo vegetado + agua libre) en todas la escenas analizadas. Por lo que se puede suponer que las áreas definidas como cultivos, tengan mezcla de suelo desnudo y cultivo. Esta señal electromagnética captada en un píxel proviene de diferentes elementos, que van a resumirse en un valor de NDVI y NDWI. Sin duda la resolución espacial influye en la distribución regional de los índices y se sumaría al efecto que tiene la distribución del tipo y uso de suelo sobre los mismos.

Ahora bien, Choi, et al. (2012), realizaron una comparación entre los índices de sequía estándar y sensores remotos utilizando las mediciones de flujo y la humedad del suelo racionalizado recogido en la Cuenca Experimental Little River, Georgia, Estados Unidos, durante el período de

2000 a 2008. Dentro de los índices examinados se encuentra el Índice de Estrés Evaporativo (ESI), el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI), un índice de sequía desarrollado a partir del producto de la humedad del suelo Avanzada Microondas Scanning Radiometer (AMSR-E), el índice de Vegetación de la Salud (VHI) y un índice desarrollado por la Universidad Libre de Amsterdam (VUA). En este estudio, los datos PDSI se obtuvieron a partir del archivo generado en la escala de la división climática por el Centro de Datos Nacional del Clima. Sobre la base de la matriz de error para condiciones de estrés hídrico moderado del suelo, el PDSI fue eficiente para diferenciar condiciones húmedas y secas, con una precisión global del 85-91 % y detecta correctamente las condiciones de humedad del suelo seco el 90% del tiempo. Los modelos de regresión lineal multivariable revelaron que el uso conjunto de PDSI y productos de teledetección apropiadas, mejoran las predicciones de las variables hidrológicas observados.

Así, se identifica la importancia de desarrollar una metodología que permita la implementación de los índices de sequía mediante técnicas de sensores remotos. Ejemplo de ello fue Qiaozhen, et al. (2013), quienes desarrollaron un método con teledetección para generar en tiempo casi real un índice de gravedad de la sequía (DSI) para monitorear y detectar la sequía a nivel mundial a 1 km de resolución espacial y frecuencias regulares de 8 días, mensuales y anuales. Esta metodología integra el DSI y explota la información operativa de la corriente terrestre evapotranspirativa basado en satélites (ET) y productos del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que son sensibles al estrés hídrico de la vegetación. Los resultados de DSI fueron derivados a nivel mundial y documentó grandes sequías regionales en la última década, incluyendo eventos severos de Europa (2003), Amazonas (2005 y 2010), y Rusia (2010). La DSI correspondió favorablemente (coeficiente de correlación $r = 0,43$) con el índice de severidad de la sequía de Palmer basado en la precipitación (IDSP), mientras que ambos índices capturaron patrones de humedecimiento y secado similares.

Ahora bien, Hurtado G., y Cadena M. (2002), aseguran que en la metodología utilizada por Palmer, se estima la ETP por el método de Thornthwaite, sin embargo ésta puede calcularse por cualquier otra fórmula. No obstante, debido a que el cálculo de la evapotranspiración potencial mediante técnicas de sensores remotos suele ser complejo, para este estudio se decidió utilizar la metodología desarrollada por Thornthwaite W., (1948) debido a que su variable de entrada es la temperatura, la que se puede obtener mediante sensores remotos.

A manera de conclusión, se puede afirmar que generalmente el IDSP se obtiene de manera puntual en cada estación meteorológica. Sin embargo, existen zonas en la cuales no se cuenta con este tipo de información. Es por ello que en este estudio se aplicará el Índice de Severidad de Sequía de Palmer a partir del cálculo directo con sensores remotos, con el fin de obtener un mapa que abarca toda la zona de estudio, evitando así la omisión de información por estaciones meteorológicas.

6. METODOLOGIA

6.1. Materiales

6.1.1. Zona estudio

La zona de estudio corresponde a la parte plana del valle geográfico del Río Cauca que se encuentra en el departamento del Valle del Cauca, situado al suroccidente del país, limita por el Norte con los departamentos de Chocó, Caldas y Quindío; por el Este con los departamentos del Quindío y Tolima, por el Sur con el departamento del Cauca y por el Oeste con el océano Pacífico y el departamento del Chocó. El valle geográfico es relativamente angosto (entre 76°22' y 75°31' de longitud oeste) y posee 430 mil hectáreas planas con una altura sobre el nivel del mar que no supera los mil metros en promedio.

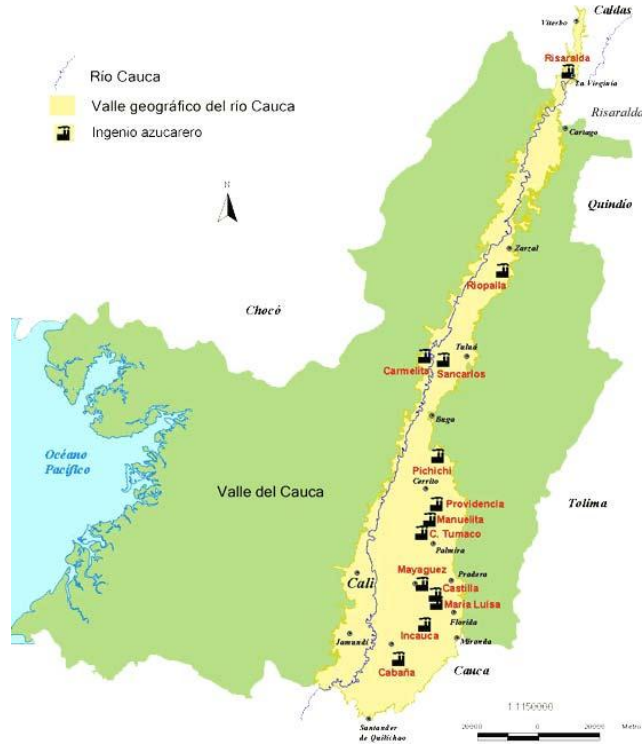


Figura 1. Mapa esquemático de la ubicación del valle geográfico del Río Cauca en el Departamento del Valle del Cauca.

Fuente: Cenicaña, 2015.

La confluencia de ríos y otras fuentes hídricas le permiten contar con una gran disponibilidad de agua, aumentando el potencial natural. La parte plana (del valle geográfico) es un polo de desarrollo industrial y asiento de varias ciudades intermedias. Existen aproximadamente 410.000 has de las cuales 230.000 has están sembradas en caña de azúcar (Moreno P., 2015).

6.1.2. Obtención de información

6.1.2.1. Modis

El sensor remoto Modis ofrece información amplia y actualizada de imágenes de satélite del globo terrestre cada 1 o 2 días, presentes en dos naves espaciales de la Nasa (Terra y Aqua). Esta información de alta sensibilidad radiométrica se encuentra distribuida en 36 bandas espectrales y en tres diferentes resoluciones, a saber: 250m², 500m² y 1000m². Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó una resolución de 1000m² cada 8 días correspondientes al día juliano para el año 2012, debido a que el producto de temperatura superficial de Modis MOD11A2 se encuentra a esta resolución. Por tanto, cada mes cuenta con 4 imágenes de temperatura, excepto para los meses de Mayo y Noviembre.

La cobertura espacial se encuentra divididos en tiles o cuadros con cobertura global de 10° por 10°. Para el caso del Valle del Cauca, el tile que cubre esta zona es h10v08, como se muestra en la Figura2. La letra “v” corresponde a las fila y la letra “h” está definido para las columnas, de esta manera se puede hacer una selección adecuado del área de interés:

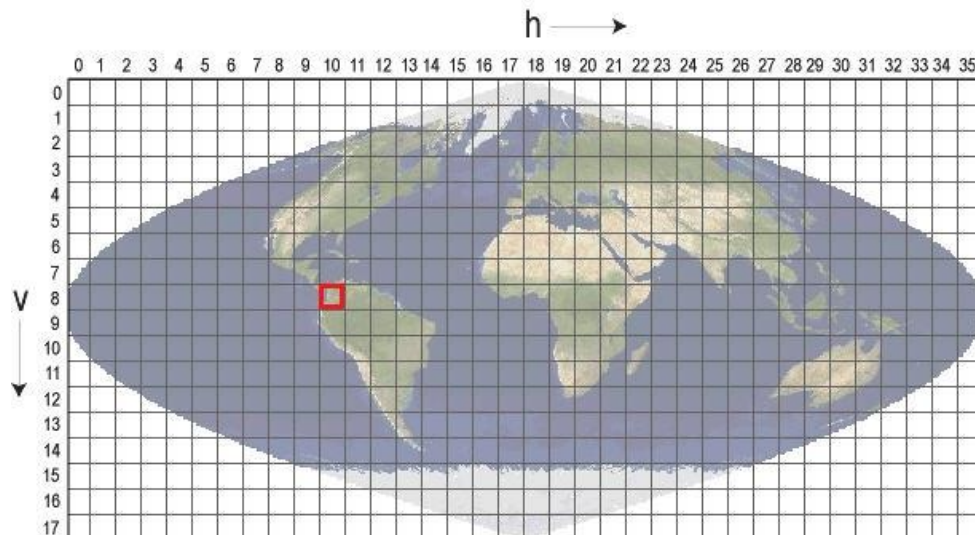


Figura 2. Distribución en tiles del globo terráqueo. Zona de estudio enmarcada en rojo

Fuente: MODIS, 2015

Cabe decir que es de libre acceso, por ende es de gran utilidad para obtener información en áreas donde no se cuenta con datos necesarios para la evaluación del suelo. Estas imágenes se pueden obtener por medio de la web de la Nasa: <ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/allData/5>

6.1.2.2. TRMM

La Plataforma MISIÓN DE MEDIDA DE LA PRECIPITACIÓN TROPICAL de la nasa por sus siglas en ingles TRMM, estudia precipitaciones o variables relacionadas que abarca una cobertura global diaria con una resolución temporal de 3 horas.

A bordo de la plataforma van instrumentos de medición primarios Radar de Precipitación (PR), Escáner de visibles e infrarrojos (VIRS) y Generador de imágenes microondas (TMI). Para el desarrollo de este trabajo, solo es de interés el producto de radar de precipitación PR que proporciona datos raster de precipitación diaria y mensual.

Se descargaron 12 imágenes pertenecientes al año 2012 del orden mensual, los cuales vienen con datos de precipitación de mm/hora, por lo que fue necesario llevar los valores a Pul/mes para el caso de estudio. Estas se encuentran a una escala de 25km².

Se puede acceder a esta información visitando el sitio WEB <http://trmm.gsfc.nasa.gov/> en la que se encuentra información diaria o mensual y en distintos formatos de descarga. Mediante el software ArcGis los datos descargados se convirtieron a formato TIFF.

6.1.2.3. Mapa de texturas y datos de estaciones meteorológicas

Se considera que para el cálculo del contenido de agua útil en el suelo (AWC, por sus siglas en inglés), es necesario contar con información de las texturas del suelo de la zona de estudio y con información sobre la profundidad de las raíces. Sin embargo, debido a que más de la mitad de las hectáreas presentes en el valle geográfico corresponde al cultivo de caña, se decidió aplicar el IDSP al cultivo de caña.

Por lo tanto, se contactó con el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA), con el fin de obtener información acerca de las texturas presentes en las zonas donde hay presencia de cultivos de caña. La información brindada por CENICAÑA es de tipo raster con formato TIFF, en donde se encuentran distribuidas las texturas en 13 clases definidas desde muy finas hasta gruesas. A partir de esta información, se reagruparon en 3 clases definidas por finas, medias y gruesas, con el fin de realizar el cálculo correcto del AWC. Este mapa se encuentra a una escala de pixel de 30m², en el sistema de referencia Colombia West Zone, Datum Bogotá.

Además del mapa de texturas, se solicitó información de las estaciones meteorológicas distribuidas por todo el valle geográfico. Esto con el fin de llevar a cabo la validación de los resultados obtenidos mediante sensores remotos. Los datos específicos que se solicitaron de las estaciones fueron de precipitación y temperatura. Junto a esta información se recibió un archivo con formato shape de la ubicación de las estaciones, en el sistema de referencia Magna Sirgas / Colombia West Zone, con la proyección Transverse Mercator.

6.2. Preprocesamiento

6.2.1. Georreferenciación

Los datos descargados del sensor Modis se encuentran almacenados en un archivo con extensión HDF, diseñado para almacenar y organizar grandes cantidades de datos numéricos. Pues bien, para seleccionar la información necesaria dentro de ese conjunto de datos, se utilizó la herramienta Modis Reprojection. Se extrajo la temperatura superficial día y noche,

correctamente georeferenciadas en formato TIFF, a un tamaño de pixel de 1000 metros, en la proyección UTM, con Datum y Spheroid WGS84.

Los valores de pixel tuvieron un tratamiento especial. Se transformaron los datos IFOV en grados Kelvin (°K) a grados Celcius (°C), a través del siguiente algoritmo: $C = (K * fs) - 273$. Donde, C indica el valor transformado a grados Celsius, K es el valor en grados Kelvin propio del producto, fs es el factor de escalamiento requerido en la transformación de datos de enteros a decimales igual a 0,02 y el valor de -273 es el valor de transformación de °K a °C.

Se promediaron las imágenes de día y noche para realizar el análisis del comportamiento de la sequía en el día, en la noche, y de forma promediada, debido a que la validación se realizó con datos promedios de estaciones meteorológicas. Por último se promediaron las 4 imágenes de cada mes (3 imágenes para Mayo y Noviembre), para obtener el promedio mensual de temperatura superficial.

6.2.2. Reproyección

Luego de tener las imágenes de temperatura de Modis georeferenciadas, es necesario reprojectar los raster, ya que estos vienen con un sistema de referencia UTM, zona 18S, con elipsoide asociado WGS84. Con el fin de procesar la información en un mismo sistema de referencia, es necesario reprojectar las imágenes al sistema de referencia de coordenadas geográficas GCS_WGS_1984 con elipsoide de referencia WGS84.

Ya que el volumen de imágenes a procesar es grande, es necesario la implementación de un script en plataforma Python como se presenta en la Figura 3 que agiliza el tiempo de procesamiento considerablemente.

```
# reprojectar.py
# Created on: 2015-03-26 11:07:36.000000
# (generated by ArcGIS/ModelBuilder)
# Description:
# -----

# Import arcpy module
import arcpy
import os
import glob
# Check out any necessary licenses
arcpy.CheckoutExtension("spatial")

# Ruta donde estan las imagenes
dir_Data = "F:\\1st\\"

# Listar los archivos con extension TIF
list= glob.glob(dir_Data + "\\*.tif")
print list

# Ciclo que recorre la lista de los archivos
for lt in list:

# Process: Project Raster

    arcpy.ProjectRaster_management(lt, "F:\\1st-proy-tiff\\" + lt[7:-4]+".tif",
    "GEOGCS['GCS_WGS_1984',DATUM['D_WGS_1984',SPHEROID['WGS_1984',
    6378137.0,298.257223563]],PRIMEM['Greenwich',0.0],UNIT['Degree',0.0174532925199433]],
    METADATA['World',-180.0,-90.0,180.0,90.0,0.0,0.0,0.0174532925199433,0.0,1262]]",
    "NEAREST", "9,07825400692945E-03", "", "PROJCS['WGS_84_UTM_zone_18N',
    GEOGCS['GCS_WGS_1984',DATUM['D_WGS_1984',SPHEROID['WGS_1984',6378137.0,298.257223563]],
    PRIMEM['Greenwich',0.0],UNIT['Degree',0.0174532925199433]],PROJECTION['Transverse_Mercator'],
    PARAMETER['false_easting',500000.0],PARAMETER['false_northing',0.0],
    PARAMETER['central_meridian',-75.0],PARAMETER['scale_factor',0.9996],
    PARAMETER['latitude_of_origin',0.0],UNIT['Meter',1.0]]")

# print "Imagen " +lt[7:-4]+ " finalizada"
print "Proceso finalizado"
```

Figura 3. Script de proyectar raster

El script determina unos datos de entrada, en este caso las imágenes de temperatura en el antiguo sistema de referencia y enlista dichas imágenes para procesar el cambio de sistema de referencia mediante un ciclo tipo FOR, alojando los resultados en una carpeta destino.

Por otra parte se llevó a cabo la reproyección del mapa de texturas y el Shape de estaciones meteorológicas de CENICAÑA al mismo sistema de referencia por medio del Software ArcGis 10.1.

6.2.3. Recorte de zona estudio

Con el fin de minimizar los datos de procesamiento fue necesario hacer un recorte de las imágenes, en donde se selecciona solamente el área de interés de estudio. Se hizo la selección de la sub-escena teniendo en cuenta el valle geográfico del Río Cauca, precisamente la zona cultivada por caña de azúcar y se realizó el recorte para las imágenes de precipitación de la TRMM de la NASA, y las imágenes del producto MOD11A2 de Temperatura superficial.

Teniendo en cuenta que el número de imágenes a procesar es elevado ya que se tienen 46 imágenes de LST día, 46 LST noche y 12 precipitación de la TRMM, fue necesario la implementación de un SCRIPT que ejecuta la función “EXTRACT_by_MASK” de ArcGis 10.1, el cual procesó el recorte de todas las imágenes el cual minimizó los tiempos de procesamiento.

```
# -*- coding: utf-8 -*-
#-----
# Extract_by_Mask.py
# Created on: 2015-02-15 17:08:08.00000
# (generated by ArcGIS/ModelBuilder)
# Description:
#-----

# Import arcpy module
#Importar las librerías necesarias para el SCRIPT

import arcpy
import os
import glob
# Check out any necessary licenses
arcpy.CheckoutExtension("spatial")

# Local variables:
#Ruta donde estan las imagenes
dir_Data = "F:\\lst-proy-tiff\\"

#Listar los archivos con extension TIF
list= glob.glob(dir_Data + "\\*.tif")

print list

#Shape de zona estudio
mask = "F:\\zona_estudio\\zona_validacion.shp"

#Ruta donde quedara el resultado de la mascara
output_folder = "F:\\lst_recortado\\"

#Ciclo que recorre la lista de los archivos
for lt in list:

    # Variable de entrada al modelo, tiff originales
    InRaster = lt

    #Mascara
    InMask = mask

    #Redireccion de archivo de salida
    OutRaster = output_folder + "/" + os.path.basename(lt)

    # Process: ExtractByMask
    arcpy.gp.ExtractByMask_sa(InRaster, InMask, OutRaster)

    print "Imagen finalizada"
print "Proceso finalizado"
```

Figura 4. Script de Recorte

El SCRIPT funciona ingresando una carpeta con las imágenes a recortar, el cual reconoce las que se encuentren en formato TIFF y hace una lista de los raster encontrados. Luego de hacer la lista se ingresa una máscara que es la zona a recortar, en este caso es el archivo de Texturas suministrado por CENICAÑA; por último se guarda en una carpeta destino las imágenes recortadas.

6.2.4. Remuestreo

Ya que las imágenes de precipitación, temperatura y texturas del suelo se encuentran a distintos tamaños de resolución espacial es necesario llevar las mencionadas a un mismo nivel de escala para hacer el debido proceso matricial entre los raster.

Por este motivo es necesario llevar las imágenes de temperatura y precipitación que poseen una resolución menor con un tamaño de pixel relativamente grande a la misma escala del raster de texturas suministrado por Cenicaña. Se utilizó la herramienta de remuestreo del Software ArcGis 10.1.

Cabe mencionar que en cartografía, no es recomendado llevar un dato con mayor detalle a uno con menor detalle. Sin embargo este proceso se realiza solamente para obtener todos los raster al mismo tamaño de pixel, esto con el fin de poder operarlos matricialmente entre ellos. Además, este proceso evita la pérdida o alteración de los datos de entrada.

6.2.5. Selección de estaciones excluidas por vacíos

En las imágenes de temperatura se pueden presentar vacíos en las imágenes, ya sea por error del sensor o debido a gran nubosidad, razón por la cual esos vacíos no pueden ser tomados en cuenta para el análisis. En dicho caso, se excluyeron las estaciones meteorológicas en las que se presenta esta situación.

Tabla 3. Estaciones excluidas por vacíos en información.

ESTACIONES EXCLUIDAS
Viterbo
La Virginia
Distrito Rut
Buga
Ginebra
Pradera
Guacarí
Cenicaña
Tuluá
Palmira la Rita
Aeropuerto
Palmira San José
Zarzal
Miranda
Bugalagrande
PTAR Cali

El Naranjo
Bocas de Palo
Arroyohondo

6.3. Procesamiento

6.3.1. Cálculo evapotranspiración potencial

Como datos de entrada para el cálculo de la evapotranspiración se tienen las imágenes de temperatura de día, de noche y promediada en grados centígrados. Además se contó con la variable número de horas sol diarios promedio mensual, que se obtuvo de la página web Solartopo (<http://www.solartopo.com/duracion-del-dia.htm>), quienes ofrecen información sobre la salida y la puesta de sol en todo el mundo con el análisis topográfico local. De ello se obtuvo el número de horas sol promedio para cada mes, que se tomó como valor general para todo el valle geográfico, tanto para el cálculo por medio de estaciones, como por sensores remotos.

Pues bien, se calculó la ETP mediante la Ecuación (1), y se obtuvo valores en cm/mes. Esos valores se transformaron a pulgadas/mes. Se decidió trabajar el índice en esas unidades debido a que el documento original de Palmer, W.C., (1965) utiliza dichas unidades. Además se tuvo en cuenta el factor de corrección por latitud, la constante del lugar y el índice de calor expresado en las Ecuaciones (2), (3) y (4). Como variable de entrada en los procesos se utilizó la temperatura promedio mensual, con lo que el resultado de la ETP obtenido fue una imagen con valores de pixel en centímetros mensual, que posteriormente se transformó a pulgadas mensual.

6.3.2. Cálculo de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo o agua útil

Se realizó el cálculo del AWC mediante la Ecuación (5) para cada una de las tres clases determinadas en la Tabla 1. Para la profundidad de las raíces fue necesario convertir el valor a pulgadas por lo expresado anteriormente. Los valores resultantes se asignaron a la imagen de texturas clasificadas en las mismas tres clases, en la tabla de atributos como una nueva columna.

6.3.3. Cálculo del balance hídrico.

Posteriormente se realizó el cálculo del balance hídrico. En este proceso se tuvo muy en cuenta las condiciones presentadas en la primera y segunda capa, ya que los resultados difieren mucho en cuanto a si se presenta una condición o no. Están determinadas por las Ecuaciones propuestas desde la (6) hasta la (20).

6.3.4. Cálculo de pérdidas, recargas y contenido de humedad en el suelo.

Finalmente se obtuvieron los valores de pérdidas, recargas y contenido total de humedad en el suelo a fin de mes aplicando las Ecuaciones (21), (22) y (23) respectivamente. Estos valores se

obtienen mediante la suma de lo que se haya encontrado tanto en la primera capa como en la segunda.

6.3.5. Cálculo del escurrimiento

El escurrimiento fue calculado mediante la Ecuación (24), en la que se tuvo en cuenta que se presentan ciertas condiciones para que se pueda efectuar dicha ecuación, ya que al no presentarse las condiciones, el valor de escurrimiento puede ser igual a cero.

6.3.6. Cálculo de evapotranspiración real

La evapotranspiración real difiere de los límites máximos o potenciales establecidos, es decir, las condiciones establecidas por los valores potenciales no siempre se dan en la realidad, por lo que se hace necesario el cálculo de la ET mediante la Ecuación (25).

6.3.7. Cálculo de coeficientes

Se calculó el coeficiente de evapotranspiración alfa, el coeficiente de recarga beta, el coeficiente de escurrimiento gamma y el coeficiente de pérdida delta a partir de las Ecuaciones (26), (27), (29) y (31) respectivamente. Para el coeficiente beta, la recarga potencial fue estimada mediante la Ecuación (28); en el coeficiente gama, el escurrimiento potencial se calculó mediante la Ecuación (30); en el coeficiente delta, la pérdida potencial de la Ecuación (32) se tuvo en cuenta las pérdidas en las dos capas del suelo.

6.3.8. Cálculo de precipitación ajustada

Ésta se realizó mediante la Ecuación (33), la cual utiliza los coeficientes alfa, beta, gama y delta, junto a los valores potenciales de evapotranspiración, recarga, escurrimiento y pérdida.

6.3.9. Cálculo de deficiencias hídricas

Para el caso de las deficiencias hídricas, en primera instancia se calculó el valor D_h mediante la Ecuación (34). Sin embargo, para el caso del promedio, el valor D de la Ecuación (35) solamente se tomó los valores absolutos del valor $\bar{D}$, debido a que, para este caso de estudio, solamente se realizó para el año 2012, razón por la cual no se realizó el promedio.

6.3.10. Cálculo del factor climático

El valor D_h fue usado para determinar el ajuste al valor del factor climático hallado en la Ecuación (36). En donde el valor K' obtenido mediante la Ecuación (37) es una primera aproximación del ajuste.

6.3.11. Cálculo del índice de humedad anormal

Aunque para el índice de humedad anormal Z obtenido por medio de la Ecuación (38) se utiliza la primera aproximación, es decir K' , es conveniente realizar ese ajuste ya que permite que el índice sea comparable entre climas húmedos y secos y para distintos meses del año.

6.3.12. Cálculo del índice de sequía de Palmer

Se calculó el valor X_i por medio de la Ecuación (39), teniendo en cuenta que para el mes de enero en donde no se cuenta con información del mes anterior, el IDSP se obtendría a partir de la Ecuación (40). Este valor corresponde al índice de Palmer para cada mes, el cual fue clasificado según los rangos ya establecidos por Palmer, que van desde condición húmeda extrema hasta sequía extrema.

6.4. Validación

En primera instancia se realizó una pequeña validación para el uso de las imágenes de temperatura, puesto que el producto de Modis MOD11A2 corresponde a información de temperatura de la superficie terrestre (del aire a 2 metros), mientras que el método para el cálculo de evapotranspiración potencial requiere información de temperatura del aire. Para ello, se compararon los valores de temperatura del aire de una estación meteorológica proporcionada por Cenicaña, con las imágenes promediadas de temperatura superficial para todos los meses del 2012 con el fin de encontrar la correlación entre ellas.

La validación del índice de Palmer se llevó a cabo a partir de la información de temperatura y precipitación de los datos de estaciones meteorológicas de la Red Meteorológica Automatizada del Sector Azucarero (RMA) brindada por la Cenicaña mostradas en la Tabla 3. Se procesó la información meteorológica un total de 34 estaciones que abarcan la zona de estudio. Sin embargo, se realizó la validación a partir de 31 estaciones, debido a que la estación Cartago no presenta información en el mes de Enero, y las estaciones Santander de Quilichao y Meléndez no están dentro de la zona de estudio. Los datos presentados corresponden a la precipitación promedio en pulgadas mensual y temperatura promedio mensual en grados centígrados para el año 2012. Una vez se obtuvo el índice, se dispuso a pasar esta información al shape de estaciones brindada por esta misma entidad, de modo que se facilitó la comparación punto a punto con las imágenes resultantes de la metodología propuesta. A continuación se listan las estaciones RMA utilizadas, con su respectiva posición geográfica:

Tabla 4. Estaciones RMA utilizadas para validación

Nro	ESTACION	EST	COD	INICIO_OPE	LATITUD	LONGITUD
1	AEROPUERTO	AER	21	Jul-96	3,51100414	-76,3813270
2	AMAIME	AMA	11	Sep-93	3,63512532	-76,2573663
3	ARROYOHONDO	HON	23	Dic-96	3,52985932	-76,5036575
4	BOCAS DE PALO	BDP	16	Sep-95	3,26445190	-76,4795757
5	BUGALAGRANDE	BLG	26	May-97	4,20310817	-76,1810415
6	CANDELARIA	CAN	13	Sep-93	3,43492946	-76,3369473

7	CENICANA	CEN	0	Sep-93	3,36010423	-76,3003902
8	CORINTO	COR	17	Sep-95	3,11243801	-76,3176332
9	GINEBRA	GIN	24	Feb-97	3,68730693	-76,2737799
10	GUACARI	GUA	10	Sep-93	3,77288328	-76,3227646
11	JAMUNDI	JAM	15	Dic-95	3,27523935	-76,5340698
12	LA PAILA	PAI	9	Sep-93	4,32300537	-76,0845409
13	MIRANDA	MIR	1	Sep-93	3,25952848	-76,2856879
14	ORTIGAL	ORT	18	Ene-96	3,26715014	-76,3452814
15	PALMIRA SAN JOSE	PSJ	22	Dic-96	3,52166413	-76,2649356
16	PRADERA	PRA	19	Sep-95	3,40058887	-76,2373553
17	SAN MARCOS	MAR	5	Sep-93	3,60409823	-76,4541729
18	TULUA	TUL	7	Sep-93	4,05084138	-76,2338671
19	YOTOCO	YOT	28	Jul-97	3,87882288	-76,3650021
20	ZARZAL	ZAR	27	Jun-97	4,41763705	-76,0779892
21	LA VIRGINIA	VIR	8	Sep-93	4,90924493	-75,8981720
22	VITERBO	VIT	20	Jun-96	5,03340817	-75,8580700
23	RIOFRIO	RIO	30	Ene-02	4,13163883	-76,2763680
24	GUACHINTE	GCH	32	Ene-07	3,16629568	-76,5601627
25	EL TIPLE	TIP	31	Ene-07	3,34135977	-76,4247894
26	ROZO	ROZ	33	Ene-07	3,61137595	-76,3635335
27	DISTRITO RUT	RUT	34	Ene-07	4,56506391	-76,0182446
28	BUGA	BUG	35	--	3,96921982	-76,2853905
29	EL NARANJO	NAR	4	Sep-93	3,17645540	-76,3976471
30	PTAR CALI	PTA	25	May-97	3,46921320	-76,4771452
31	PALMIRA LA RITA	PLR	2	May-96	3,57374395	-76,2778550

Tabla 5. Datos de temperatura promedio mensual en °C para el año 2012 estaciones RMA

 CENICAÑA PROGRAMA DE AGRONOMIA AREA DE METEOROLOGIA RED METEOROLOGICA AUTOMATIZADA DE LA INDUSTRIA AZUCARERA COLOMBIANA Resumen anual de temperatura media del aire AÑO 2012													
Zona	Estación meteorológica	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Norte	VITERBO	22,6	22,6	22,6	22,4	23,0	23,1	23,3	23,2	23,4	22,6	22,7	22,9
	LA VIRGINIA	23,3	23,5	23,2	22,8	23,3	23,3	23,5	23,5	23,6	23,0	23,0	23,3
	DISTRITO RUT	23,7	24,2	24,1	23,4	24,1	24,2	24,3	24,7	25,0	23,9	24,2	24,1
	ZARZAL	22,2	22,4	22,5	22,0	22,7	22,9	22,7	23,0	23,1	22,0	22,4	22,4
Centro - Norte	LA PAILA	22,0	22,1	22,3	22,0	23,2	23,7	23,3	23,7	23,7	22,7	23,0	23,0
	BUGALAGRANDE	22,9	23,0	23,1	22,9	23,0	23,4	23,2	23,8	23,7	22,6	22,9	22,9
	RIOFRIO	22,7	22,7	23,0	22,4	23,0	23,4	23,2	23,5	23,6	22,4	22,9	23,2
	TULUA	22,9	22,9	23,1	22,7	23,3	23,6	23,5	23,4	23,6	22,7	23,0	23,3
	BUGA	23,3	23,3	23,4	22,8	23,4	23,8	23,7	23,8	23,7	22,8	23,3	23,4

	YOTOCO	23,4	23,4	23,6	23,4	24,0	24,4	24,3	24,5	24,5	23,4	23,8	23,9
Centro	GUACARI	22,9	22,9	23,2	22,8	23,3	23,7	23,8	23,8	23,9	22,9	23,3	23,4
	GINEBRA	22,5	22,7	23,2	22,7	23,4	23,6	23,6	23,6	23,6	22,6	22,9	23,2
	AMAIME	22,6	22,7	23,3	22,9	23,4	23,7	24,1	24,1	24,2	22,9	23,3	23,4
	SAN MARCOS	23,2	23,3	23,7	23,1	23,7	24,0	24,2	24,4	24,2	23,3	23,6	23,8
	ROZO	23,2	23,2	23,5	23,0	23,5	23,8	23,9	24,0	24,1	23,1	23,6	23,9
	PALMIRA LA RITA	22,8	22,9	23,3	23,4	23,3	23,4	23,6	23,7	23,7	22,8	23,2	23,4
	ARROYOHONDO	22,8	22,9	23,6	22,8	23,4	23,7	24,0	24,2	24,2	23,1	23,4	23,5
	AEROPUERTO	22,8	22,8	23,2	22,8	23,3	23,6	23,8	24,1	23,9	22,9	23,2	23,5
	PALMIRA SAN JOSE	22,5	22,5	23,1	22,8	23,1	23,4	23,6	23,5	23,4	22,6	22,9	23,1
Centro - Sur	PTAR CALI	23,7	23,9	24,1	23,4	23,8	24,4	24,6	24,9	24,9	23,6	23,9	23,9
	CANDELARIA	23,1	23,3	23,7	23,3	23,7	24,0	24,2	24,3	24,2	23,3	23,6	23,8
	PRADERA	22,3	22,4	22,9	22,4	22,7	23,1	23,6	23,7	23,8	22,6	22,9	23,1
	EL TIPLE	23,3	23,1	23,6	23,0	23,0	23,5	23,8	23,9	23,7	22,8	22,9	23,1
	CENICANA	22,6	22,7	23,1	22,6	23,2	23,5	23,8	23,6	23,8	22,7	23,0	23,1
Sur	JAMUNDI	22,0	21,9	22,2	21,8	22,4	22,7	22,8	22,9	22,9	22,1	22,1	22,2
	BOCAS DE PALO	23,1	23,1	23,6	23,1	23,6	23,8	23,9	23,9	23,8	23,1	23,2	23,5
	ORTIGAL	22,5	22,5	22,7	22,3	22,8	23,1	23,1	23,1	23,1	22,4	22,7	23,1
	MIRANDA	22,6	22,6	22,7	22,5	22,9	23,1	23,2	23,2	23,3	22,6	22,8	23,0
	EL NARANJO	22,7	23,4	23,6	23,4	23,8	24,1	24,4	24,6	24,6	23,6	23,5	23,9
	GUACHINTE	23,3	23,3	23,6	23,1	23,6	23,8	24,1	24,2	24,4	23,6	23,7	23,8
	CORINTO	22,2	22,2	22,6	22,2	22,9	23,3	23,8	23,8	24,1	22,8	22,6	22,9

Tabla 6. Datos de precipitación promedio mensual en pulgadas para el año 2012 estaciones RMA

 CENICAÑA PROGRAMA DE AGRONOMIA AREA DE METEOROLOGIA RED METEOROLOGICA AUTOMATIZADA DE LA INDUSTRIA AZUCARERA COLOMBIANA Resumen anual de precipitación AÑO 2012													
Zona	Estación meteorológica	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Norte	VITERBO	5,1	8,9	7,0	8,3	8,0	3,0	2,3	6,3	2,0	6,1	8,0	5,6
	LA VIRGINIA	5,8	4,9	8,9	9,5	7,5	2,9	1,1	5,8	1,8	5,7	7,1	4,7
	DISTRITO RUT	3,5	1,4	4,2	10,4	2,1	2,6	3,1	2,2	0,4	3,7	3,9	2,3
	ZARZAL	2,1	3,6	3,6	3,8	2,3	1,2	1,5	0,9	2,0	4,1	4,3	2,3
Centro - Norte	LA PAILA	4,0	2,3	3,7	11,3	4,9	1,6	3,0	0,8	1,2	4,6	4,9	3,3
	BUGALAGRANDE	7,7	2,7	6,7	8,0	4,4	1,5	3,3	1,1	1,2	6,9	6,0	2,8
	RIOFRIO	7,7	6,2	6,5	11,3	6,0	4,0	3,4	1,3	1,7	7,1	3,7	2,0
	TULUA	10,0	2,7	7,1	9,3	5,3	1,8	0,8	3,1	1,2	6,6	3,5	2,1

	BUGA	3,2	2,8	5,6	6,9	4,5	1,6	2,8	0,9	3,8	6,5	1,5	3,5
	YOTOCO	4,4	2,1	5,1	7,5	2,2	2,7	2,3	1,7	0,8	8,3	2,7	2,1
Centro	GUACARI	2,8	2,2	3,6	7,8	2,3	3,8	1,1	3,6	1,2	5,1	1,5	1,1
	GINEBRA	8,6	1,7	2,4	7,9	2,6	2,6	3,0	1,8	0,4	6,6	2,9	2,1
	AMAIME	6,5	2,0	2,0	8,6	1,4	3,0	0,5	2,8	1,0	8,4	4,9	2,5
	SAN MARCOS	3,2	1,6	4,5	7,1	1,6	2,0	0,4	1,0	0,4	3,8	2,0	2,4
	ROZO	3,9	2,4	2,9	4,4	1,3	0,9	0,5	0,9	0,3	4,3	0,6	1,2
	PALMIRA LA RITA	7,7	2,9	2,1	8,8	1,4	3,4	0,3	3,5	0,8	8,9	4,1	1,3
	ARROYOHONDO	4,8	3,3	4,5	11,6	4,0	3,0	0,4	1,4	1,3	7,6	3,4	5,4
	AEROPUERTO	5,8	4,0	2,6	7,0	3,1	1,2	0,2	2,8	0,6	4,9	1,2	0,6
	PALMIRA SAN JOSE	7,7	4,7	3,9	4,8	2,1	1,0	0,3	3,9	1,1	9,1	5,4	2,6
	PTAR CALI	3,6	0,5	4,9	9,7	1,9	0,4	0,1	1,7	1,2	3,6	1,6	2,7
Centro - Sur	CANDELARIA	8,9	1,6	2,8	5,4	4,1	1,0	0,5	1,1	1,0	6,7	2,4	2,2
	PRADERA	9,7	3,0	2,8	8,9	1,2	1,4	0,3	0,6	1,2	10,1	1,0	3,1
	EL TIPLE	9,5	4,5	7,2	8,9	4,6	1,1	0,2	1,4	1,4	4,8	6,8	0,8
	CENICANA	7,8	2,5	5,2	8,1	1,9	1,3	0,3	1,3	1,2	8,7	2,5	4,0
	JAMUNDI	8,0	4,2	5,5	12,4	3,4	0,6	2,1	0,9	1,1	5,8	6,5	5,0
Sur	BOCAS DE PALO	8,7	4,0	3,9	8,3	4,1	0,6	0,6	1,9	1,0	4,0	3,7	1,9
	ORTIGAL	15,5	0,6	3,8	9,5	2,3	2,4	0,2	1,9	1,6	8,1	4,1	2,6
	MIRANDA	9,5	6,8	7,6	9,6	3,8	1,7	1,9	2,1	2,5	11,4	1,9	3,3
	EL NARANJO	9,8	5,2	5,6	9,4	6,4	3,0	0,7	0,3	1,6	6,7	5,4	3,6
	GUACHINTE	9,5	6,5	7,8	9,1	5,0	2,2	0,7	4,6	1,7	7,7	5,1	5,9
	CORINTO	14,0	4,2	7,3	9,7	5,2	6,3	0,4	0,8	1,1	6,4	1,6	5,4

7. RESULTADOS

El primer resultado es del cálculo de AWC, que es la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. Se tienen las variables de entradas correspondientes, en el cual se calculó solamente para el cultivo de caña en general. No obstante si se consideran todas las variedades de cultivos de caña, cambiaría la variable PrR que corresponde a la profundidad de las raíces. Estos cálculos se presentan en la Tabla 6:

Tabla 7. Cálculo del AWC para cultivos de Caña

TIPO DE SUELO	CC	PMP	PEA	PrR	AWC (mm)	AWC (pulg)
Fina (arcilla)	35	17	1,25	500	112,5	4,5
Media (franco)	22	10	1,4	500	84	3,36
Gruesa (arenoso)	9	4	1,65	500	41,25	1,65

La Tabla 6. Muestra la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo para los tres tipos de suelos presentes en la zona de estudio: Fina, Media y Gruesa. Para el cual se relacionan variables de entrada como Capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), peso específico aparente del suelo (PEA) y la profundidad de las raíces (PrR) y como variable de salida el AWC. Para tipos de suelo fino, se tiene un AWC de 4,5 pulgadas, para suelo medio un AWC de 3,36 pulgadas y gruesa con un AWC de 1,65 pulgadas, lo que significa que el suelo puede

almacenar diferentes capacidades de agua dependiendo de la textura que componga el suelo y el tipo de cultivo de la caña de azúcar.

Se puede observar que la mayor capacidad de almacenamiento de agua en el suelo pertenece al tipo de suelo de textura fina, ya que la capacidad de campo en este tipo de suelo es mayor, con respecto al tipo de suelo medio y grueso que decrece respectivamente.

El mapa de capacidad de almacenamiento de agua en el suelo para cultivos de caña puede ser consultado en el **Anexo 1**. Se puede visualizar que el mayor tipo de textura presente en la zona de estudio es de tipo fino, por ende gran parte del cálculo del índice de Palmer se realizará con un AWC de 4,5. Este mapa corresponde al AWC en las dos capas, es decir, que a partir de este mapa se calculó el AWC en la capa sub-superficial.

Seguido a ello, el IDSP resultante se encuentra desde el **Anexo 2** hasta el **Anexo 37**, en donde se observa el índice de palmer para día, noche y promedio. Los mapas contienen las categorías establecidos para dicho índice, además de contener la ubicación de las estaciones meteorológicas. Posee un sistema de referencia y localización general de la zona de estudio.

Para analizar el comportamiento de la sequía en el valle geográfico del Rio Cauca, se calculó el IDSP a partir de las imágenes de temperatura de día, de noche y promediado. Se agrupó la información en tablas de los datos obtenidos mediante técnicas de sensores remotos, tales como precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial y el índice de Palmer (día, promedio y noche), con el fin de compararlos con los datos de estaciones meteorológicas. Además se presentan gráficos de líneas divididos en meses con el fin de observar de una manera adecuada el comportamiento de dichas variables a lo largo del año, y una tabla de correlaciones entre sensores remotos y datos de estaciones.

De los datos obtenidos, se pudo observar que en ciertos casos tanto la ETP como la temperatura tomaron valores iguales a cero, como se muestra de ejemplo en la estación Viterbo:

Tabla 8. Resultados puntuales estación Viterbo

	SENSORES REMOTOS										EST. METEOROLOGICAS			
MES	P	Td	Tp	Tn	ETP d	ETP p	ETP n	IDSP d	IDSP p	IDSP n	P	T	ETP	IDSP
ENE	10,2	25,57	21,27	16,96	4,451	3,124	2,569	0	0	0	5,068	22,6	3,515	0
FEB	5,587	26,46	22,62	18,77	5,16	3,659	3,053	-2E-06	0	0	8,896	22,6	3,535	0
MAR	8,877	28,2	19,41	10,61	6,772	2,521	1,201	-2E-06	0	0	7,04	22,6	3,56	0
ABR	13,3	28,66	14,33	0	7,304	1,199	0	-1E-06	0	-2,282	8,336	22,4	3,504	0,898
MAY	9,592	26,78	22,77	18,76	5,545	3,804	3,118	-1E-06	0	-2,047	7,956	23	3,789	0,806
JUN	4,708	26,3	22,13	17,96	5,157	3,554	2,91	-0,431	0	-1,836	3,04	23,1	3,844	0,068
JUL	4,028	28,67	21,68	14,69	7,375	3,373	2,087	-0,866	0	-1,647	2,32	23,3	3,929	-0,882
AGO	5,848	28,6	23,6	18,61	7,255	4,14	3,063	-1,093	0	-1,477	6,304	23,2	3,862	-0,791
SEP	4,442	29,79	23,95	18,12	8,526	4,26	2,909	-1,479	0	-1,325	2,024	23,4	3,92	-1,746
OCT	11,27	28,38	22,95	17,51	6,925	3,803	2,73	-1,326	0	-1,189	6,06	22,6	3,545	-1,566
NOV	9,873	28,24	24,56	20,88	6,737	4,47	3,623	-1,19	0	-1,066	8,04	22,7	3,562	-1,405
DIC	7,706	26,52	21,99	17,46	5,183	3,398	2,699	-1,067	2E-06	-0,957	5,58	22,9	3,648	-1,26

La Tabla 8 muestra los resultados puntuales de la estación Viterbo del IDSP con temporalidad mensual. La Tabla se encuentra dividida en dos secciones: sensores remotos y estaciones meteorológicas. La sección de sensores remotos muestra variables de entrada como la precipitación (P), temperatura día (Td), temperatura promedio (Tp), temperatura noche (Tn), evapotranspiración potencial día (ETP d), evapotranspiración potencial promedio (ETP p), evapotranspiración potencial noche (ETP n); y como variable de salida IDSP, para una temporalidad de día, promedio y noche (IDSPd, IDSPp, IDSPn respectivamente); mientras que la sección de estaciones meteorológicas cuenta con estas mismas variables, no se analiza la información en la temporalidad (día, promedio y noche) ya que no se cuenta con este tipo de datos.

La Figura 5 muestra los comparativos de variables de la estación Viterbo. Donde se relacionan la precipitación (P), temperatura (T), evapotranspiración potencial (ETP), e índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP) figurados en la Tabla 7.

Se observa que la relación de la precipitación en la Figura 5a se encuentra en un rango de 0 a 14 pul/mes, tanto para los datos de sensores remotos (línea gris) y estaciones meteorológicas (línea naranja). La tendencia de los datos es aparentemente similar con una diferencia en el dato de sensores remoto de precipitación en el mes de abril, que presenta un pico elevado.

Esta diferencia notoria que presentan los datos de precipitación se debe a que los datos obtenidos con estaciones meteorológicas obtienen un valor puntual, mientras que con sensores remotos para este tipo de variable se obtuvo un valor de precipitación por pixel de 25 km². Este valor se obtiene de un promedio de una zona más extensa que para este caso, hace que los valores varíen, y se refleja de manera general en una sobre estimación de esta variable.

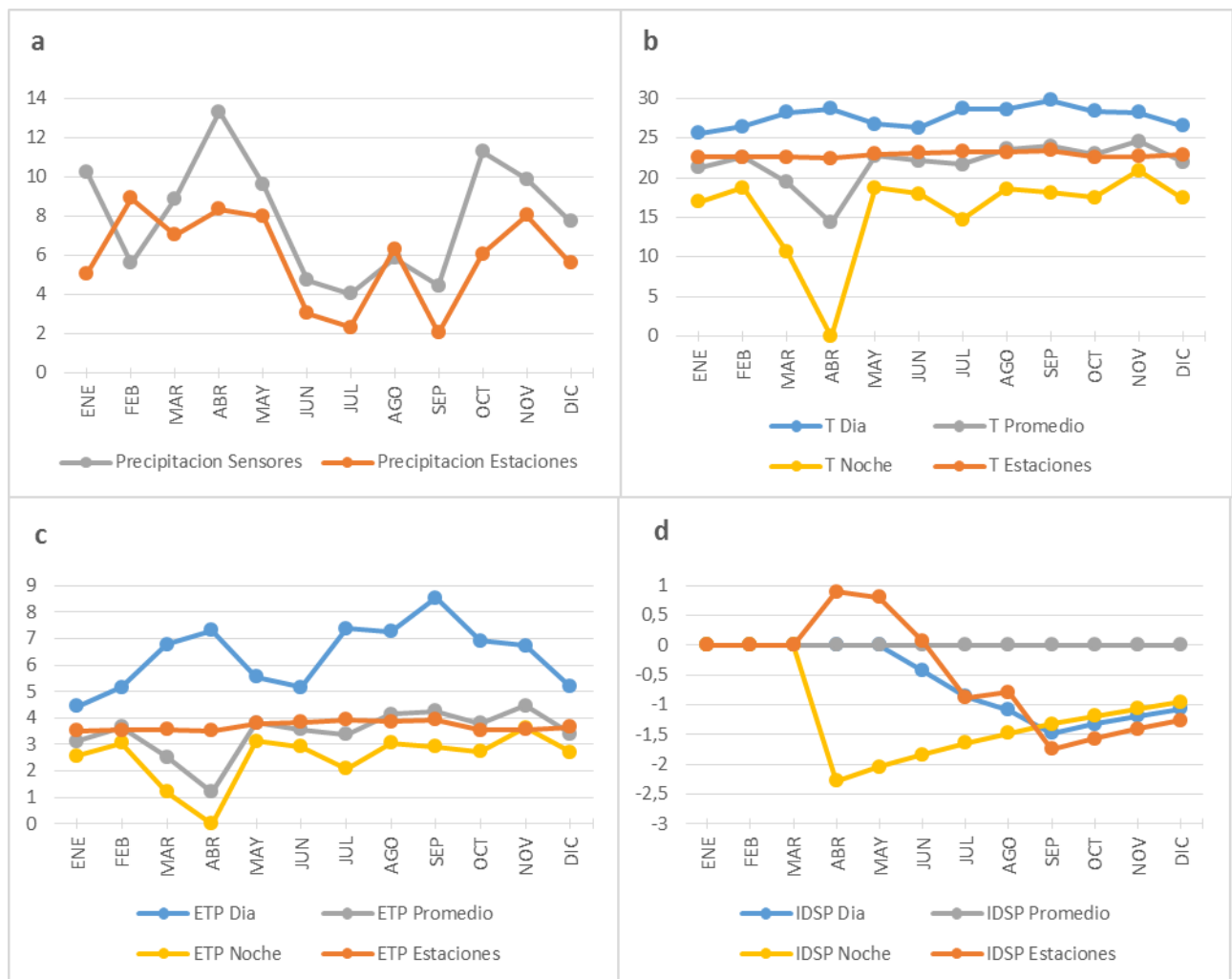


Figura 5. Comparación de variables estación Viterbo

Se puede observar la relación de temperatura en la Figura 5b se encuentra en un rango de 0 a 30°C. Se representó con línea azul la temperatura día, con línea gris la temperatura promedio, con línea amarilla la temperatura promedio y con línea naranja la temperatura de la estación meteorológica.

La relación entre temperatura día y estaciones meteorológica muestran una tendencia similar a diferencia de la temperatura promedio y noche que presentan un pico descendente en el mes de abril, siendo más notorio para la noche que obtiene un valor de 0°C, que corresponde a vacíos en la imagen MODIS.

En la figura 5c se observa el comportamiento de la evapotranspiración potencial (ETP). Los valores se encuentran en un rango de 0 a 9pul/mes.

La tendencia de la ETP día muestra un comportamiento en los datos superior a las relacionadas, la de estaciones meteorológica muestran una tendencia homogénea, a diferencia de la

temperatura promedio y noche que presentan un pico descendente en el mes de abril, siendo más notorio para la noche que obtiene un valor de 0 pul/mes.

El pico en el mes de abril se presenta por que el valor de temperatura perteneciente a la noche, relacionado en el anterior grafico tiene un valor de 0 y puesto que la ETP se calcula a partir de la variable de temperatura el resultado es alterado.

En la Figura 5d se observa el comportamiento del índice de severidad de sequía de palmer (IDSP). Los valores se encuentran en un rango de -3 a 1.

La tendencia de los datos no muestra un comportamiento homogéneo para los casos de estudio, esto se debe a que el IDSP es un índice acumulativo, es decir tiene en cuenta el dato del mes anterior, y ya que en los valores de las variables pertenecientes al mes de abril se encuentran alteradas no se puede tener en cuenta el IDSP.

No obstante, debido a que las estaciones son datos puntuales, se presenta un mapa de zonas con datos no confiables en el que se pueden observar las zonas que no se tomarán como validación.

La Figura 6 muestra el mapa con zonas de datos no confiables que no se tuvo en cuenta para el análisis. La zona de estudio cubre un área de 2.092.950.418 Km² de las cuales 1.643.555.499 Km² corresponde a zonas con datos no confiables. Es decir el 79% de la zona de estudio se encuentra sin información.

El porcentaje de las zonas de estudio que no cuenta con información, puede ser disminuido si se tiene en cuenta el proceso de interpolación y correcto promediado de las imágenes satelitales lo que permite como resultado una imagen sin vacíos.

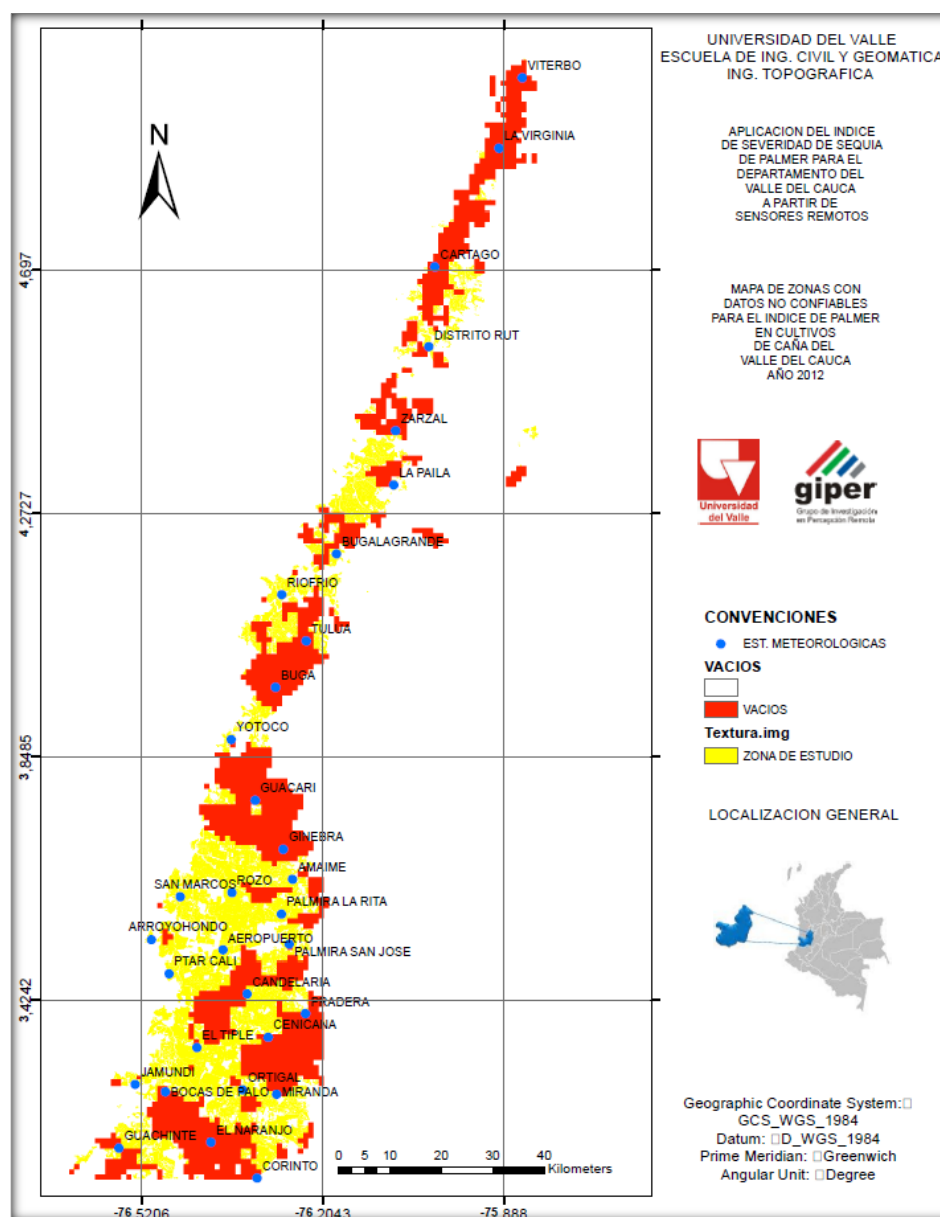


Figura 6. Zonas con datos no confiables

Ahora bien, con respecto a las estaciones que no presentaron dichos errores, a continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de ellas:

Tabla 9. Resultados puntuales estación La Paila.

MES	SENSORES REMOTOS										EST. METEOROLÓGICAS			
	P	Td	Tp	Tn	ETP d	ETP p	ETP n	IDSP d	IDSP p	IDSP n	P	T	ETP	IDSP
ENE	9,721	26,34	22,65	18,97	4,772	3,394	2,769	0	0	0	3,972	22	3,266	0
FEB	5,829	29,73	24,39	19,06	8,504	4,249	2,812	-0,587	0	0	2,312	22,1	3,324	-0,755
MAR	7,879	27,83	23,79	19,76	6,264	3,973	3,039	-0,527	0	2E-06	3,732	22,3	3,43	-0,677
ABR	11,42	28,2	24,56	20,92	6,729	4,402	3,431	-0,472	0	2E-06	11,32	22	3,334	0,386
MAY	8,22	25,24	22,1	18,95	4,009	3,24	2,842	-0,424	0	1E-06	4,856	23,2	3,875	0,346

JUN	4,822	29,56	24,44	19,32	8,49	4,38	2,961	-0,788	0	1E-06	1,604	23,7	4,116	-0,751
JUL	4,157	28,93	23,41	17,89	7,651	3,849	2,541	-1,215	0	1E-06	3,04	23,3	3,926	-0,965
AGO	4,843	29,6	24,03	18,47	8,48	4,138	2,689	-1,292	0	1E-06	0,828	23,7	4,088	-1,608
SEP	5,808	33,78	26,21	18,64	15,73	5,306	2,716	-1,229	0	9E-07	1,244	23,7	4,055	-1,695
OCT	11,75	31,28	24,76	18,25	10,85	4,455	2,589	-1,102	0	8E-07	4,564	22,7	3,584	-1,52
NOV	9,408	29,09	23,32	17,56	7,64	3,705	2,382	-0,989	0	7E-07	4,86	23	3,688	-1,363
DIC	8,682	28,38	23,78	19,17	6,802	3,922	2,833	-0,887	0	6E-07	3,332	23	3,688	-1,618

La Tabla 9 muestra los resultados puntuales de la estación La Paila del IDSP con temporalidad mensual. La Figura 7 muestra los comparativos de variables de la estación La Paila. Donde se relacionan la precipitación (P), temperatura (T), evapotranspiración potencial (ETP), e índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP) figurados en la Tabla 9. Se conservan los colores aplicados en las anteriores figuras.

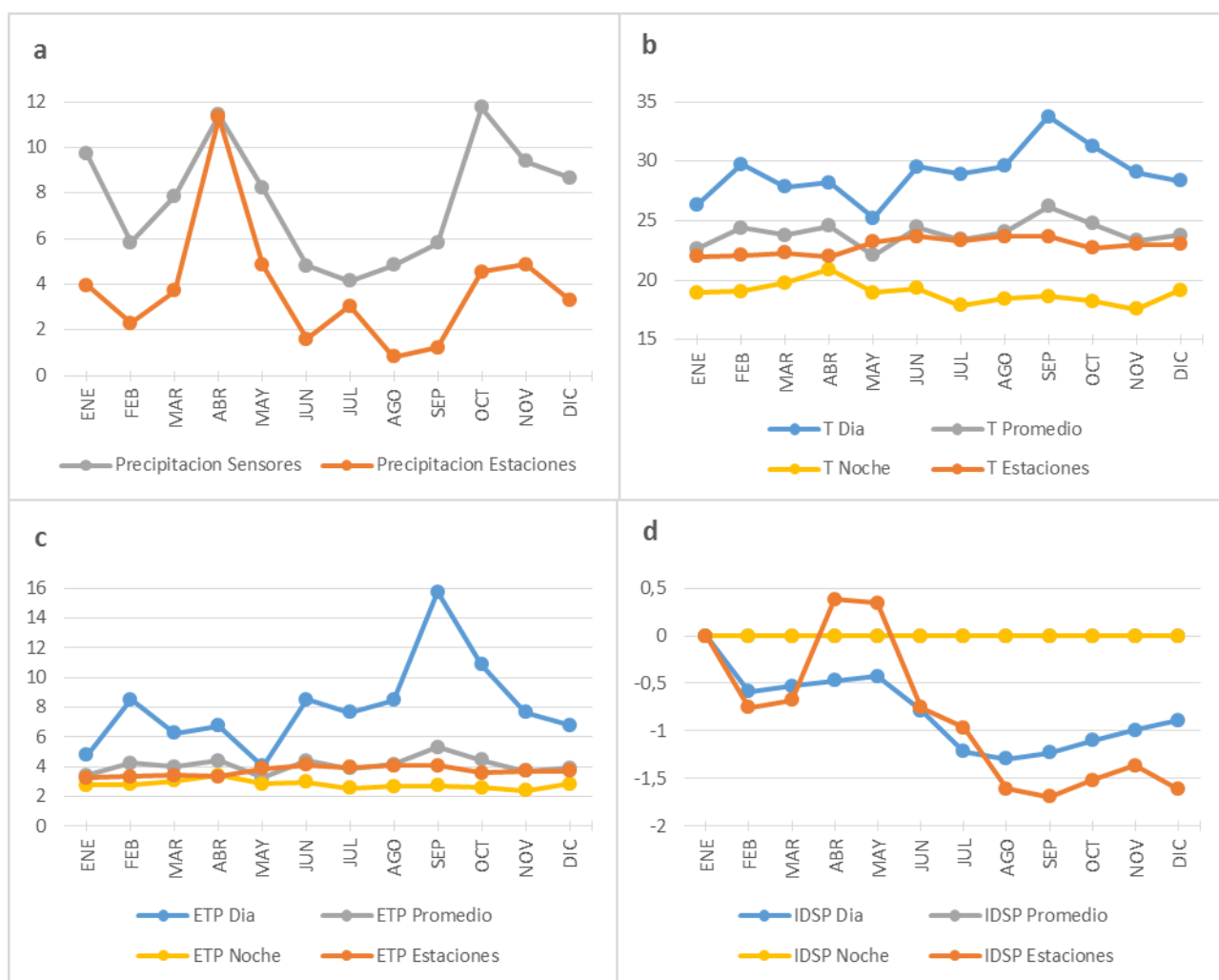


Figura 7. Comparación de variables estación La Paila

Se observa que la relación de precipitación en la Figura 7a se encuentra en un rango de 0 a 12 pul/mes, tanto para los datos de sensores remotos (línea gris) como para las estaciones

meteorológicas (línea naranja). La tendencia de los datos es aparentemente similar con una diferencia en el dato de sensores remotos de precipitación, ya que presenta valores más elevados. Se observa que la relación de temperatura en la Figura 7b se encuentra en un rango de 15 a 35°C, presentando valores altos en las imágenes de día y valores bajos en las de noche, mientras que en las imágenes promedio se mantiene estable con respecto a los datos de la estación meteorológica.

La relación entre temperatura promedio y estaciones meteorológicas muestran una tendencia y valores similares a diferencia de la temperatura día y noche que presentan un comportamiento relacionados pero valores diferentes.

Esto se presentó debido a que en las imágenes de temperatura es capturada a una hora determinada, en la que el sensor pasa por la zona de estudio. Por lo que los valores de temperatura se ven afectados ya que el dato obtenido es de una temporalidad puntual y no promediado.

En la Figura 7c se observa la relación de la evapotranspiración potencial (ETP). Se encuentra en un rango de 0 a 16pul/mes.

La tendencia de la ETP día muestra un comportamiento en los datos superior al que muestran los otros 3 tipos, esto se debe a que la ETP es calculado a partir de los datos de temperatura, y ya que los valores de temperatura perteneciente al día son más elevados hace que la ETP muestre un crecimiento mayor.

En la Figura 7d se observa la relación del índice de severidad de sequía de palmer (IDSP). Se encuentra en un rango de -2 a 0.5.

La tendencia de los datos de IDSP promedio y noche muestra un comportamiento de condiciones normales mientras que los datos de IDSP día y estaciones meteorológicas, muestra un comportamiento de sequía incipiente y suave.

El pico presente al mes de abril en los datos de estaciones meteorológicas, se debe a que los valores de precipitación perteneciente al mismo, son superiores a los presentados con sensores remotos.

Tabla 10. Resultados puntuales estación Rio Frio

MES	SENSORES REMOTOS										EST. METEOROLOGICAS			
	P	Td	Tp	Tn	ETP d	ETP p	ETP n	IDSP d	IDSP p	IDSP n	P	T	ETP	IDSP
ENE	10,96	25,8	22,28	18,76	4,451	3,255	2,687	0	0	-3E-06	7,668	22,7	3,541	0
FEB	6,928	28,71	23,89	19,07	7,243	4,011	2,79	-0,351	0	-3E-06	6,18	22,7	3,561	0
MAR	10,18	28,1	24,03	19,97	6,616	4,111	3,082	-0,315	0	-3E-06	6,516	23	3,716	0
ABR	13,22	28,21	23,92	19,62	6,794	4,086	3	-0,283	0	-6E-06	11,3	22,4	3,487	1,031
MAY	10,14	26,18	23,49	20,8	4,886	3,904	3,395	-0,254	0	-5E-06	6,016	23	3,773	0,925
JUN	6,184	30,11	24,8	19,48	9,201	4,584	2,986	-0,762	0	-5E-06	4,04	23,4	3,965	0,83
JUL	5,287	28,72	24,03	19,34	7,42	4,175	2,937	-1,129	-2E-06	-4E-06	3,404	23,2	3,868	0,276
AGO	6,497	30,07	24,14	18,21	9,084	4,211	2,592	-1,357	-2E-06	-4E-06	1,328	23,5	3,984	-1,018
SEP	8,018	29,25	23,85	18,45	7,948	4,029	2,637	-1,217	-1E-06	-3E-06	1,72	23,6	3,998	-1,696

OCT	11,93	28,76	23,73	18,71	7,315	3,945	2,693	-1,092	-1E-06	3E-07	7,056	22,4	3,444	-1,521
NOV	10,61	29,29	23,99	18,69	7,893	4,045	2,67	-0,979	-1E-06	3E-07	3,72	22,9	3,632	-1,365
DIC	10,03	28,94	23,47	18	7,477	3,794	2,477	-0,878	-1E-06	4E-06	1,972	23,2	3,763	-2,234

La Tabla 10 muestra los resultados puntuales de la estación Río Frio del IDSP con temporalidad mensual. En la Figura 8 se presentan los comparativos de variables de la estación Río Frio. Donde se relacionan la precipitación (P), temperatura (T), evapotranspiración potencial (ETP), e índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP) figurados en la Tabla 10.

En la Figura 8a se observa que la relación de precipitación se encuentra en un rango de 0 a 14 pul/mes, tanto para los datos de sensores remotos y estaciones meteorológicas. La tendencia de los datos es aparentemente similar con una diferencia en el dato de sensores remotos de precipitación, ya que presenta valores más elevados.

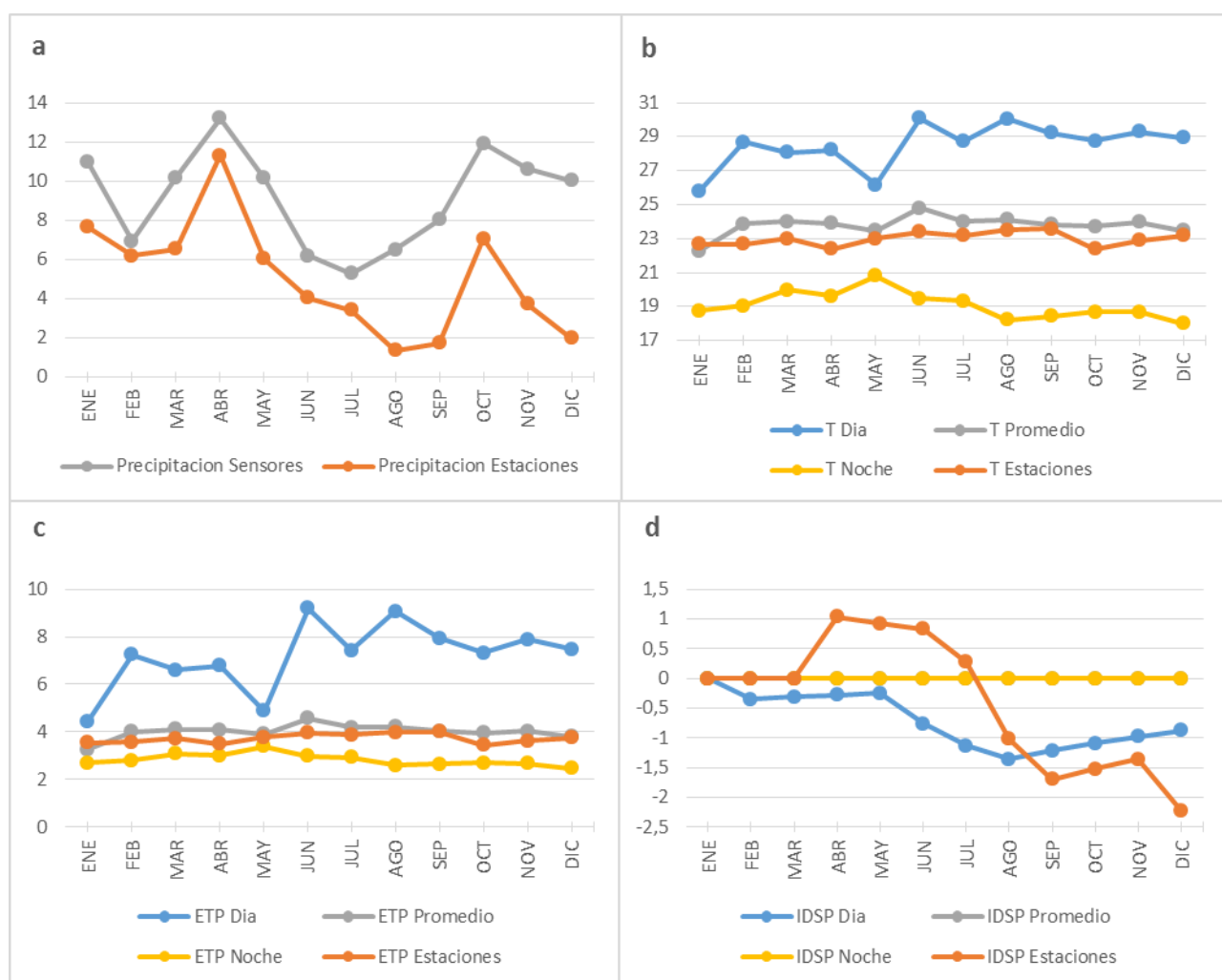


Figura 8. Comparación de variables estación Río Frio

En la Figura 8b se puede observar que la relación de temperatura se encuentra en un rango de 17 a 31°C. En la Figura 8c se puede observar que la relación de la evapotranspiración potencial (ETP) se encuentra en un rango de 0 a 10 pul/mes, en donde se presenta un comportamiento un poco elevado en las imágenes de día con respecto a las demás. En la Figura 8d se puede observar que la relación del índice de severidad de sequía de palmer (IDSP) Se encuentra en un rango de -2.5 a 1.5.

La tendencia de los datos de IDSP promedio y noche muestra un comportamiento de condiciones normales mientras que los datos de IDSP día y estaciones meteorológicas, muestra un comportamiento de humedad incipiente, condiciones normales, sequía incipiente, suave y moderada.

Tabla 11. Resultados puntuales estación Yotoco

MES	SENSORES REMOTOS										EST. METEOROLOGICAS			
	P	Td	Tp	Tn	ETP d	ETP p	ETP n	IDSP d	IDSP p	IDSP n	P	T	ETP	IDSP
ENE	8,563	27,79	23,5	19,22	6,02	3,705	2,769	0	0	0	4,428	23,4	3,746	0
FEB	5,552	28,08	23,08	18,08	6,38	3,518	2,453	-0,575	0	0	2,06	23,4	3,767	-0,981
MAR	6,795	30,18	25,17	20,15	9,253	4,645	3,09	-1,128	0	0	5,108	23,6	3,889	-0,88
ABR	9,447	29,47	23,66	17,86	8,266	3,864	2,43	-1,012	0	0	7,456	23,4	3,824	-0,077
MAY	7,027	28,02	23,34	18,65	6,457	3,724	2,675	-0,908	0	0	2,164	24	4,148	-0,608
JUN	4,378	29,18	24,63	20,07	7,946	4,418	3,119	-1,246	-0,081	0	2,744	24,4	4,367	-0,86
JUL	3,28	29,05	24,52	19,99	7,758	4,354	3,09	-1,719	-0,695	9E-07	2,32	24,3	4,308	-1,041
AGO	4,328	31,12	25,54	19,96	10,92	4,919	3,063	-1,554	-0,909	8E-07	1,728	24,5	4,389	-1,16
SEP	5,894	33,35	26,42	19,49	15,36	5,422	2,891	-1,394	-0,815	7E-07	0,8	24,5	4,354	-1,198
OCT	9,504	30,63	25,3	19,98	9,921	4,705	3,024	-1,25	-0,731	6E-07	8,32	23,4	3,777	-1,075
NOV	8,287	30,76	25,49	20,22	10,07	4,782	3,077	-1,122	-0,656	6E-07	2,668	23,8	3,943	-1,799
DIC	7,29	28,41	24,23	20,05	6,739	4,079	3,023	-1,006	-0,588	2E-06	2,108	23,9	3,992	-2,545

La Tabla 11 muestra los resultados puntuales de la estación Yotoco del IDSP con temporalidad mensual. La Figura 9 muestra los comparativos de variables de la estación Yotoco. Donde se relacionan la precipitación, temperatura (T), evapotranspiración potencial (ETP), e índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP) figurados en la Tabla 11.

En la Figura 9a se observa que la relación de precipitación se encuentra en un rango de 0 a 10 pul/mes, tanto para los datos de sensores remotos (línea gris) y estaciones meteorológicas (línea naranja). La tendencia de los datos es aparentemente similar con una diferencia en el dato de sensores remoto de precipitación, ya que presenta valores más elevados.

En la Figura 9b se puede observar que la relación de temperatura se encuentra en un rango de 17 a 32°C. En la Figura 9c se puede observar que la relación de la evapotranspiración potencial (ETP) se encuentra en un rango de 0 a 16 pul/mes.

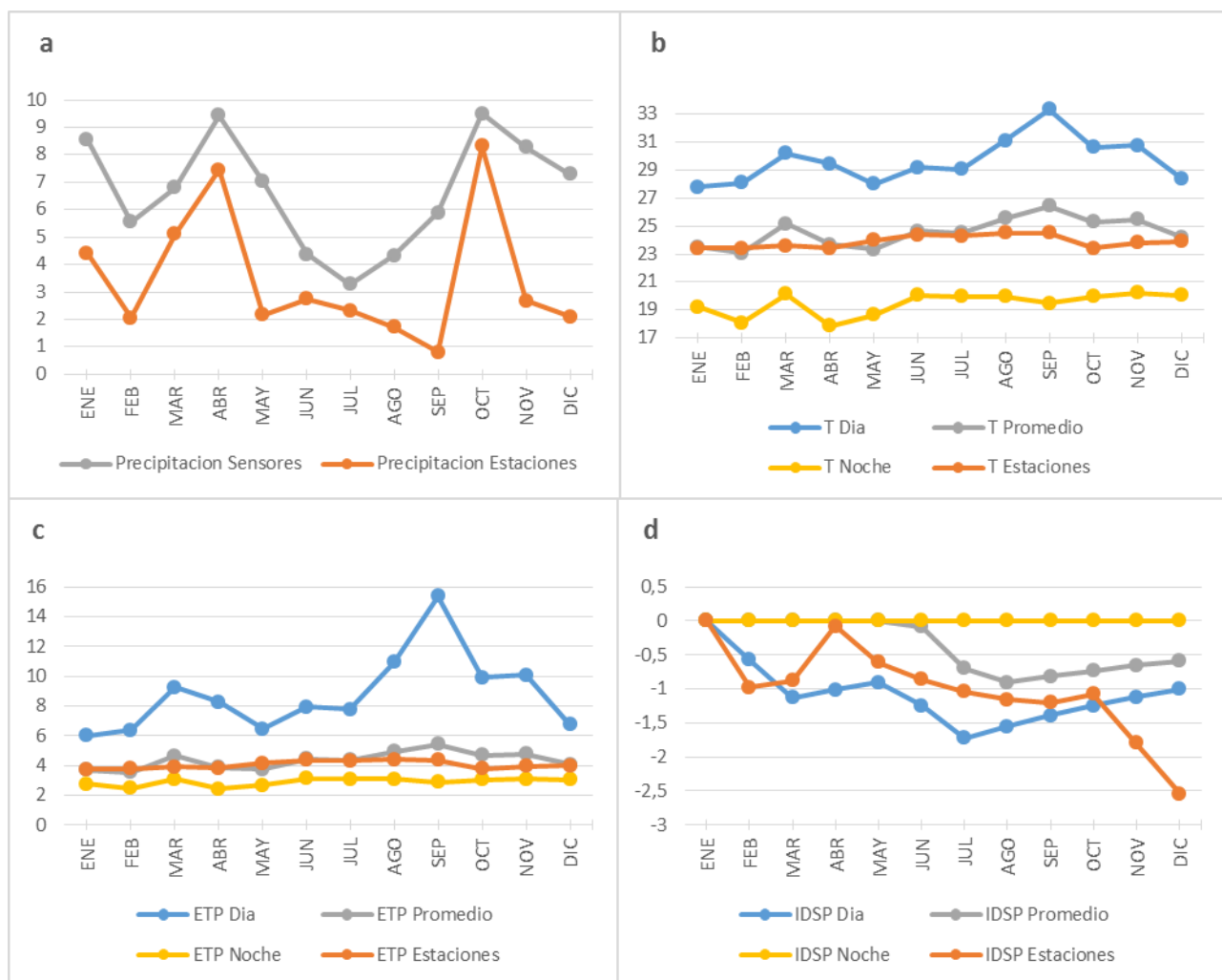


Figura 9. Comparación de variables estación Yotoco

En la figura 9d se observa que la relación del índice de severidad de sequía de palmer (IDSP) se encuentra en un rango de -3 a 0.5.

La tendencia de los datos de IDSP noche muestran un comportamiento de condiciones normales mientras que los datos de IDSP día, promedio y estaciones meteorológicas, muestra un comportamiento de condiciones normales, sequía incipiente, suave y moderada.

Tabla 12. Resultados puntuales estación Amaime

	SENSORES REMOTOS										EST. METEOROLÓGICAS			
MES	P	Td	Tp	Tn	ETP d	ETP p	ETP n	IDSP d	IDSP p	IDSP n	P	T	ETP	IDSP
ENE	7,499	26,06	22,33	18,6	4,514	3,267	2,706	0	0	0	6,548	22,6	3,45	0
FEB	4,584	28,76	23,32	17,87	7,268	3,729	2,518	-0,588	0	0	2,028	22,7	3,512	-0,915
MAR	5,511	28,56	23,94	19,33	7,078	4,06	2,949	-0,926	0	0	1,996	23,3	3,806	-1,712
ABR	8,57	27,92	23,57	19,22	6,405	3,909	2,943	-0,831	0	0	8,644	22,9	3,655	-0,806
MAY	5,297	31,06	25,61	20,16	10,73	5,022	3,249	-0,637	0	0	1,352	23,4	3,911	-1,022
JUN	3,344	29,22	23,71	18,2	8,036	4,015	2,673	-0,635	-0,527	-9E-07	2,952	23,7	4,065	-0,995

JUL	2,417	28,86	24,23	19,61	7,564	4,275	3,083	-0,569	-1,132	-0,525	0,476	24,1	4,255	-1,096
AGO	3,376	29,41	24,05	18,7	8,225	4,159	2,797	-0,511	-1,318	-0,471	2,768	24,1	4,232	-1
SEP	4,874	29,18	23,01	16,84	7,864	3,623	2,268	-0,458	-1,182	-0,423	0,968	24,2	4,247	-0,923
OCT	8,889	30,84	25,19	19,53	10,17	4,69	2,998	-0,411	-1,06	-0,379	8,408	22,9	3,61	-0,828
NOV	7,257	30,98	23,98	16,98	10,32	4,033	2,273	-0,368	-0,951	-0,34	4,932	23,3	3,764	-0,743
DIC	5,462	28,41	23,34	18,28	6,826	3,727	2,619	-0,331	-0,853	-0,305	2,46	23,4	3,81	-1,528

La Tabla 12 muestra los resultados puntuales de la estación Amaime del IDSP con temporalidad mensual. La Figura 10 muestra los comparativos de variables de la estación Amaime. Donde se relacionan la precipitación, temperatura (T), evapotranspiración potencial (ETP), e índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP) figurados en la Tabla 12.

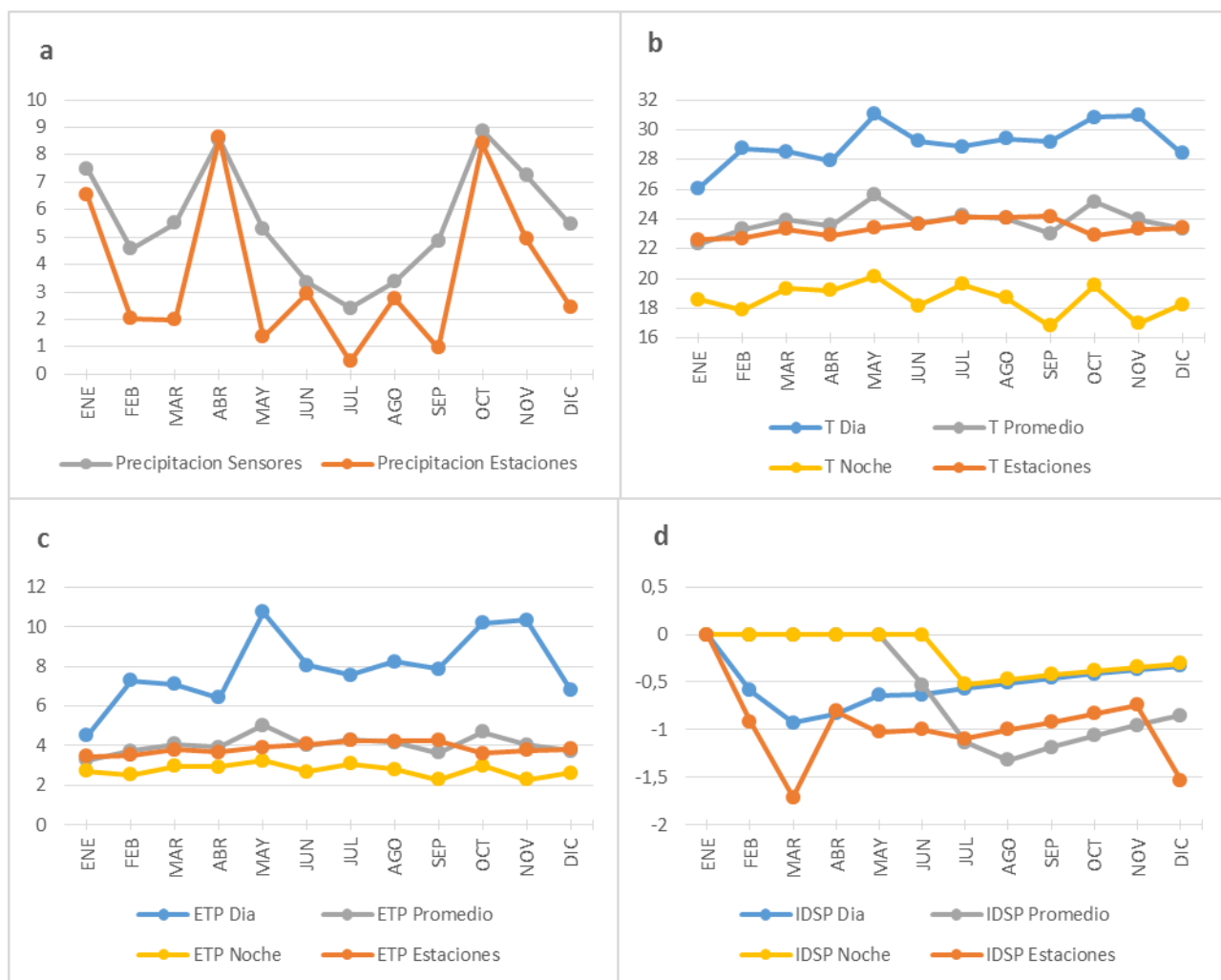


Figura 10. Comparación de variables estación Amaime

En la Figura 10a se observa que la relación de precipitación se encuentra en un rango de 0 a 10 pul/mes, tanto para los datos de sensores remotos (línea gris) y estaciones meteorológicas (línea naranja). La tendencia de los datos es aparentemente similar con una diferencia en el dato de sensores remoto de precipitación, ya que presenta valores más elevados.

En la Figura 10b se observa que la relación de temperatura se encuentra en un rango de 16 a 32°C. En la Figura 10c la relación de la evapotranspiración potencial (ETP) se encuentra en un rango de 0 a 12 pul/mes. En la Figura 10d se observa que la relación del índice de severidad de sequía de palmer (IDSP) se encuentra en un rango de -2 a 0.5. La tendencia de los datos de IDSP para los 4 tipos, muestran un comportamiento de condiciones normales, sequía incipiente y suave.

Tabla 13.Resultados puntuales estación San Marcos

	SENSORES REMOTOS										EST. METEOROLOGICAS			
MES	P	Td	Tp	Tn	ETP d	ETP p	ETP n	IDSP d	IDSP p	IDSP n	P	T	ETP	IDSP
ENE	7,499	27,23	23,7	20,16	5,394	3,782	3,039	0	0	0	3,24	23,2	3,675	-0,45
FEB	4,584	30,32	24,51	18,69	9,415	4,23	2,612	-0,093	0	0	1,636	23,3	3,741	-1,528
MAR	5,511	33,01	26,82	20,62	14,66	5,664	3,225	-0,432	-0,219	0	4,464	23,7	3,958	-1,37
ABR	8,57	29,28	24,51	19,74	7,992	4,297	2,97	-0,387	-0,196	0	7,116	23,1	3,705	-0,436
MAY	5,297	28,18	23,44	18,7	6,612	3,756	2,673	-0,965	-0,176	0	1,556	23,7	4,018	-0,995
JUN	3,344	29,84	24,79	19,75	8,892	4,499	3	-0,866	-0,789	-9E-07	1,952	24	4,178	-1,216
JUL	2,417	30,59	25,38	20,17	10,08	4,835	3,13	-0,776	-1,316	-0,541	0,4	24,2	4,274	-1,475
AGO	3,376	30,98	25,64	20,3	10,7	4,967	3,155	-0,696	-1,512	-0,486	1,012	24,4	4,354	-1,385
SEP	4,874	29,48	24,04	18,6	8,231	4,02	2,611	-0,625	-1,356	-0,436	0,444	24,2	4,216	-1,266
OCT	8,889	29,71	25,14	20,56	8,506	4,596	3,193	-0,56	-1,217	-0,391	3,836	23,3	3,752	-1,136
NOV	7,257	29,32	23,8	18,29	7,887	3,842	2,487	-1,015	-1,091	-0,35	1,976	23,6	3,867	-1,811
DIC	5,462	30,13	24,85	19,57	9,078	4,403	2,862	-1,566	-0,979	-0,314	2,372	23,8	3,962	-1,626

La Tabla 13 muestra los resultados puntuales de la estación San Marcos del IDSP con temporalidad mensual. La Figura 11 muestra los comparativos de variables de la estación San Marcos Donde se relacionan la precipitación, temperatura (T), evapotranspiración potencial (ETP), e índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP) figurados en la Tabla 13.

En la Figura 11a se observa que la relación de precipitación se encuentra en un rango de 0 a 10pul/mes, tanto para los datos de sensores remotos y estaciones. La tendencia de los datos es aparentemente similar con una diferencia en el dato de sensores remoto de precipitación, ya que presenta valores más elevados.

En la Figura 11b se observa que la relación de temperatura se encuentra en un rango de 16 a 34°C. En la Figura 11c se observa que la relación de la evapotranspiración potencial (ETP) se encuentra en un rango de 0 a 16 pul/mes. En la Figura 11d se observa que la relación del índice de severidad de sequía de palmer (IDSP) se encuentra en un rango de -2 a 0.5. La tendencia de los datos de IDSP para los 4 tipos, muestran un comportamiento de condiciones normales, sequía incipiente y suave.

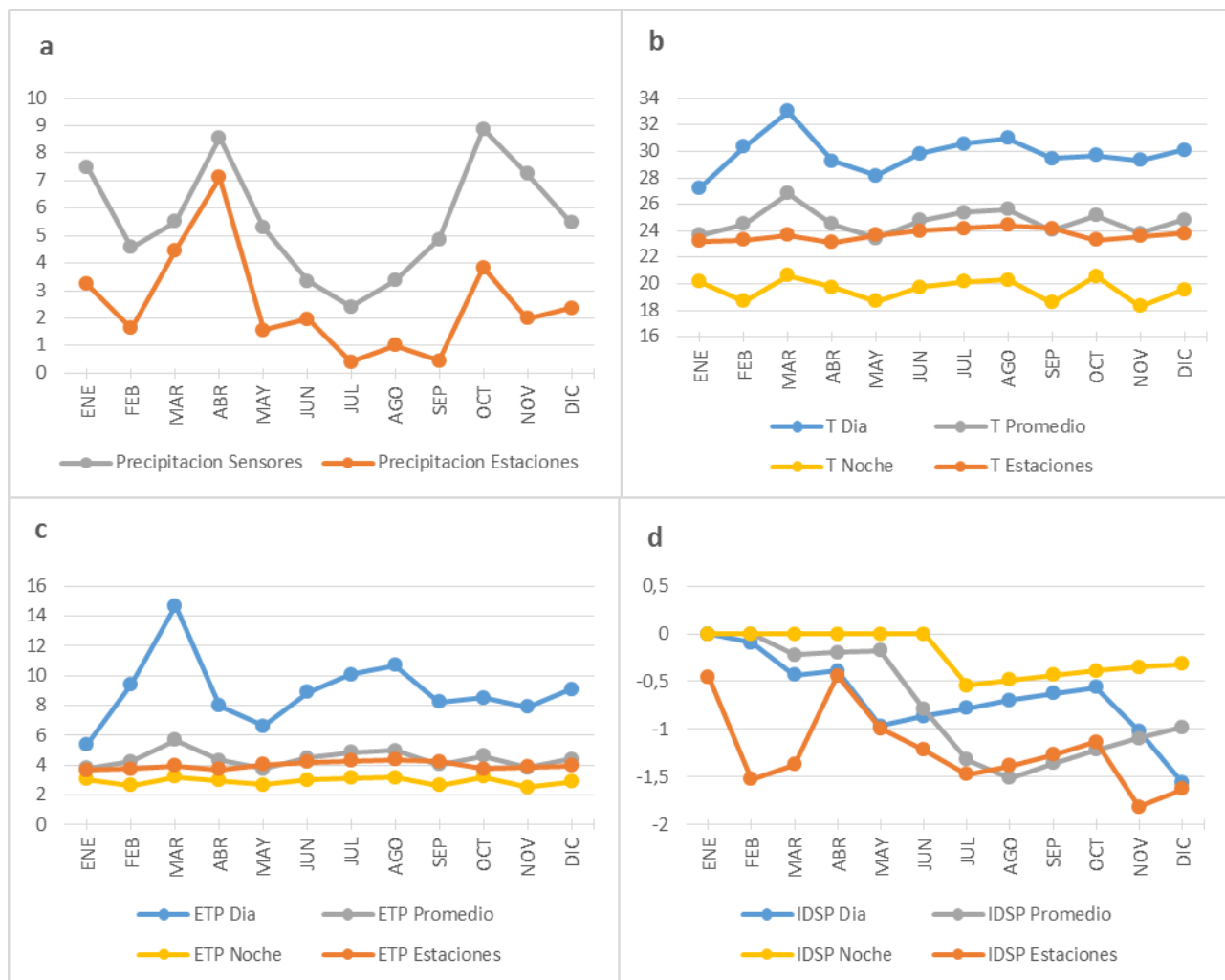


Figura 11. Comparación de variables estación San Marcos

Tabla 14. Resultados puntuales estación Rozo

MES	SENSORES REMOTOS										EST. METEOROLÓGICAS			
	P	Td	Tp	Tn	ETP d	ETP p	ETP n	IDSP d	IDSP p	IDSP n	P	T	ETP	IDSP
ENE	7,499	25,6	22,18	18,76	4,029	3,157	2,721	0	2E-06	0	3,924	23,2	3,692	0
FEB	4,584	28,67	22,38	16,09	7,109	3,262	2,025	-0,608	2E-06	0	2,412	23,2	3,713	-0,848
MAR	5,511	29,95	24,82	19,68	8,9	4,485	3,027	-1,153	1E-06	0	2,9	23,5	3,878	-1,376
ABR	8,57	27,32	23,29	19,26	5,686	3,735	2,925	-1,034	1E-06	0	4,396	23	3,677	-1,043
MAY	5,297	26,76	23,48	20,2	5,165	3,854	3,234	-0,927	1E-06	0	1,336	23,5	3,937	-1,308
JUN	3,344	27,6	23,46	19,32	6,038	3,854	2,97	-1,487	-0,461	0	0,944	23,8	4,094	-1,415
JUL	2,417	27,9	23,64	19,39	6,357	3,94	2,989	-1,922	-1,071	-0,489	0,54	23,9	4,138	-1,382
AGO	3,376	32,85	26,16	19,47	14,24	5,316	2,996	-1,911	-1,496	-0,439	0,9	24	4,165	-1,265
SEP	4,874	33,78	25,68	17,58	16,22	4,986	2,433	-1,714	-1,392	-0,393	0,252	24,1	4,18	-1,146
OCT	8,889	29,86	23,83	17,81	8,731	3,954	2,477	-1,537	-1,248	-0,353	4,316	23,1	3,677	-1,028
NOV	7,257	33,26	26,04	18,82	14,81	5,126	2,741	-2,074	-1,12	-0,316	0,632	23,6	3,883	-1,952
DIC	5,462	30,03	24,78	19,53	8,919	4,415	2,947	-1,86	-1,004	-0,284	1,16	23,9	4,025	-1,752

La Tabla 14 muestra los resultados puntuales de la estación Rozo del IDSP con temporalidad mensual. La Figura 12 muestra los comparativos de variables de la estación Rozo donde se relacionan la precipitación, temperatura (T), evapotranspiración potencial (ETP), e índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP) figurados en la Tabla 14.

En la Figura 12a se observa que la relación de precipitación se encuentra en un rango de (0 a 10 pul/mes, tanto para los datos de sensores remotos y estaciones meteorológicas. La tendencia de los datos es aparentemente similar con una diferencia en el dato de sensores remotos de precipitación, ya que presenta valores más elevados.

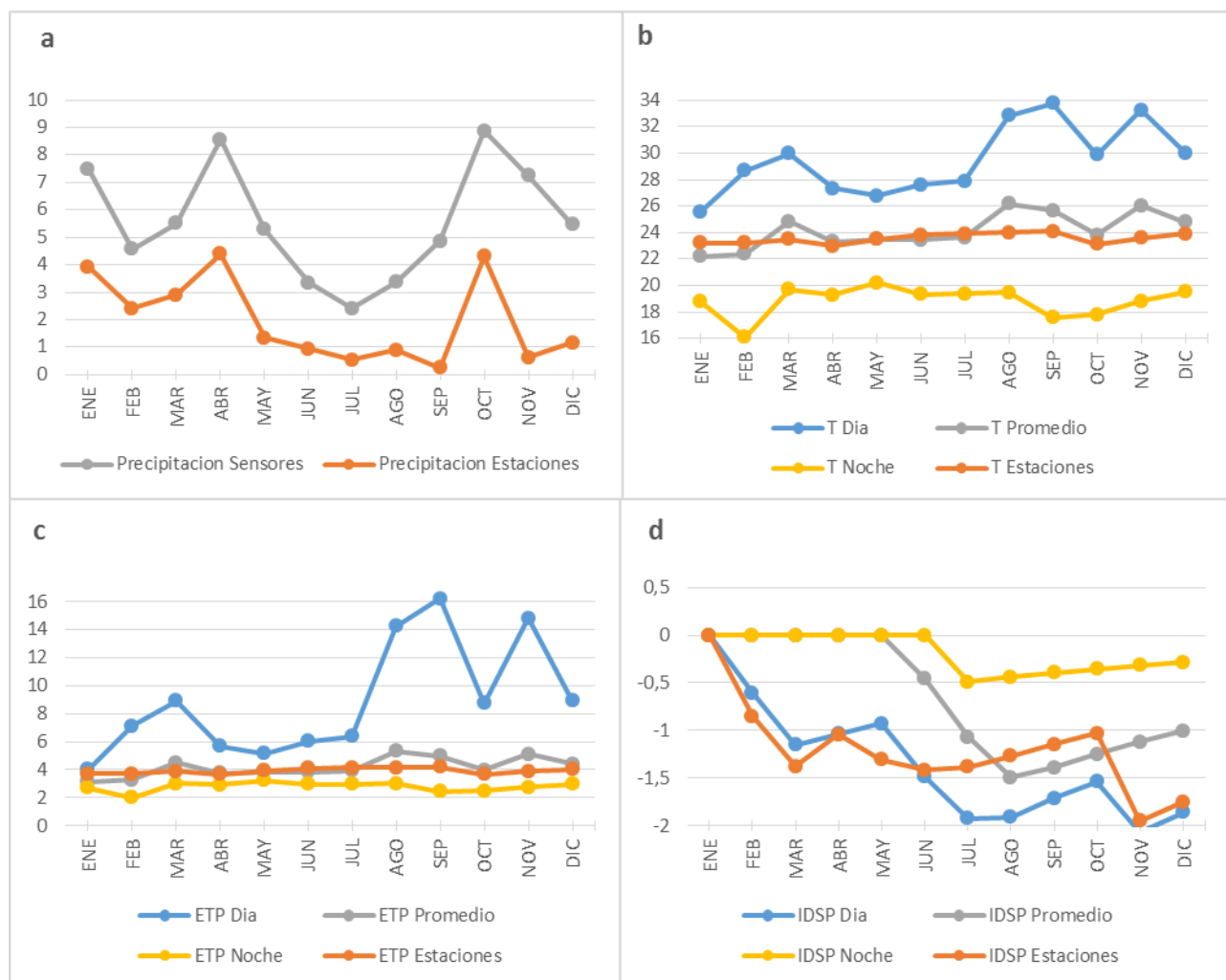


Figura 12. Gráfico de comparación de variables estación Rozo

En la Figura 12b se observa que la relación de temperatura se encuentra en un rango de 16 a 34°C. En la Figura 12c se observa que la relación de la evapotranspiración potencial (ETP) se encuentra en un rango de 0 a 16 pul/mes. En la Figura 12d se observa que la relación del índice de severidad de sequía de palmer (IDSP) se encuentra en un rango de -2 a 0.5. La tendencia de

los datos de IDSP para los 4 tipos, muestran un comportamiento de condiciones normales, sequía incipiente y suave.

Tabla 15. Resultados puntuales estación El Tiple

	SENSORES REMOTOS										EST. METEOROLOGICAS			
MES	P	Td	Tp	Tn	ETP d	ETP p	ETP n	IDSP d	IDSP p	IDSP n	P	T	ETP	IDSP
ENE	7,493	26,85	23,16	19,47	5,025	3,541	2,864	0	-2E-06	0	9,496	23,3	3,768	0
FEB	5,05	27,82	23,57	19,32	6,059	3,761	2,835	-0,613	-2E-06	0	4,452	23,1	3,699	0
MAR	6	30,4	24,91	19,42	9,608	4,501	2,885	-1,217	-1E-06	-2E-06	7,208	23,6	3,954	0
ABR	9,301	27,24	23,57	19,9	5,523	3,819	3,057	-1,092	-1E-06	-2E-06	8,876	23	3,71	0,944
MAY	4,739	27,51	24,13	20,74	5,849	4,134	3,348	-1,606	-1E-06	-1E-06	4,584	23	3,735	0,847
JUN	2,519	29,43	24,08	18,74	8,284	4,123	2,73	-2,162	-0,659	-0,271	1,104	23,5	3,978	-0,403
JUL	1,555	31,89	25,81	19,73	12,48	5,11	3,027	-1,939	-1,269	-0,9	0,152	23,8	4,116	-1,552
AGO	2,41	32,99	25,94	18,89	14,76	5,164	2,757	-1,74	-1,413	-0,993	1,412	23,9	4,142	-1,511
SEP	4,051	32,66	25,57	18,48	13,91	4,896	2,614	-1,56	-1,32	-0,89	1,364	23,7	4,012	-1,41
OCT	8,158	31,42	25,47	19,53	11,33	4,806	2,904	-1,4	-1,184	-0,799	4,776	22,8	3,576	-1,265
NOV	7,252	28,61	23,91	19,22	6,958	3,917	2,792	-1,256	-1,062	-0,716	6,792	22,9	3,595	-1,135
DIC	5,667	30,76	24,6	18,45	10,08	4,281	2,569	-1,793	-0,953	-0,643	0,768	23,1	3,683	-2,599

La Tabla 15 muestra los resultados puntuales de la estación El Tiple del IDSP con temporalidad mensual. La Figura 13 muestra los comparativos de variables de la estación El Tiple, donde se relacionan la precipitación, temperatura (T), evapotranspiración potencial (ETP), e índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP) figurados en la Tabla 15.

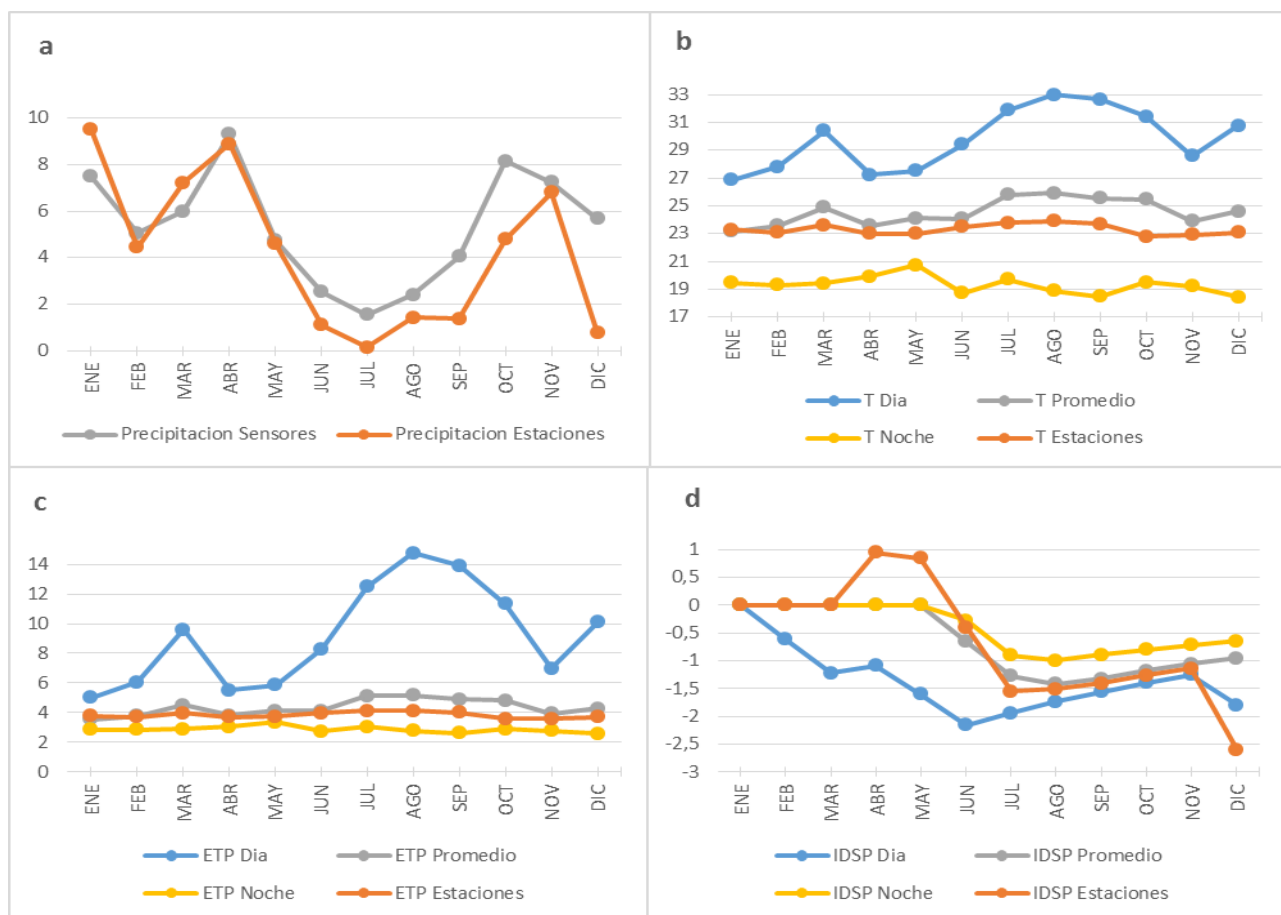


Figura 13. Gráfico de comparación de variables estación El Tiple

En la Figura 13a se observa que la relación de precipitación se encuentra en un rango de 0 a 10 pul/mes, tanto para los datos de sensores remotos y estaciones meteorológicas. La tendencia de los datos es aparentemente similar.

En la Figura 13b se observa que la relación de temperatura se encuentra en un rango de 17 a 34°C. En la Figura 13c se observa que la relación de la evapotranspiración potencial (ETP) se encuentra en un rango de 0 a 14 pul/mes. En la Figura 13d se observa que la relación del índice de severidad de sequía de palmer (IDSP) se encuentra en un rango de -3 a 1. La tendencia de los datos de IDSP para los 3 tipos en sensores remotos, muestran un comportamiento de condiciones normales, sequía incipiente y suave, mientras que los de estaciones meteorológicas tiene un comportamiento de condiciones normales, humedad incipiente, sequía incipiente, suave y moderada.

Tabla 16. Resultados puntuales estación Ortigal

MES	SENSORES REMOTOS										EST. METEOROLOGICAS			
	P	Td	Tp	Tn	ETP d	ETP p	ETP n	IDSP d	IDSP p	IDSP n	P	T	ETP	IDSP
ENE	7,493	27,2	23,23	19,26	5,621	3,677	2,853	2E-06	0	0	15,46	22,5	3,484	0
FEB	5,05	26,68	22,64	18,6	5,176	3,431	2,68	-0,19	0	0	0,604	22,5	3,503	-1,691
MAR	6	28,86	24,14	19,42	7,464	4,167	2,938	-0,823	0	0	3,788	22,7	3,612	-1,517

ABR	9,301	26,38	23,12	19,86	4,995	3,705	3,096	-0,738	0	0	9,512	22,3	3,473	-0,482
MAY	4,739	29,47	24,36	19,24	8,336	4,341	2,928	-1,087	0	0	2,292	22,8	3,711	-0,791
JUN	2,519	28,32	23,17	18,02	6,97	3,763	2,579	-1,579	-0,64	-0,109	2,412	23,1	3,853	-0,988
JUL	1,555	28,41	23,81	19,21	7,062	4,069	2,923	-1,441	-1,192	-0,749	0,232	23,1	3,848	-1,498
AGO	2,41	30,45	24,4	18,36	9,638	4,348	2,657	-1,292	-1,435	-0,819	1,868	23,1	3,827	-1,422
SEP	4,051	31,2	24,97	18,73	10,68	4,609	2,743	-1,159	-1,385	-0,735	1,648	23,1	3,796	-1,329
OCT	8,158	28,53	23,6	18,66	7,053	3,883	2,704	-1,04	-1,243	-0,659	8,068	22,4	3,472	-1,192
NOV	7,252	28,6	23,7	18,81	7,077	3,906	2,727	-0,933	-1,115	-0,591	4,08	22,7	3,572	-1,069
DIC	5,667	29,57	24,24	18,91	8,247	4,17	2,755	-1,491	-1	-0,53	2,568	23,1	3,743	-1,765

La Tabla 16 muestra los resultados puntuales de la estación Ortigal del IDSP con temporalidad mensual. La Figura 14 muestra los comparativos de variables de la estación Ortigal, donde se relacionan la precipitación, temperatura (T), evapotranspiración potencial (ETP), e índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP) figurados en la Tabla 16.

En la Figura 14a se observa que la relación de precipitación se encuentra en un rango de 0 a 16 pul/mes, tanto para los datos de sensores remotos y estaciones meteorológicas. La tendencia de los datos es aparentemente similar con una diferencia en el dato de estación meteorológica de precipitación, ya que presenta valores más elevados al inicio.

En la Figura 14b se observa que la relación de temperatura se encuentra en un rango de 17 a 31°C. En la Figura 14c se observa que la relación de la evapotranspiración potencial (ETP) se encuentra en un rango de 0 a 12 pul/mes.

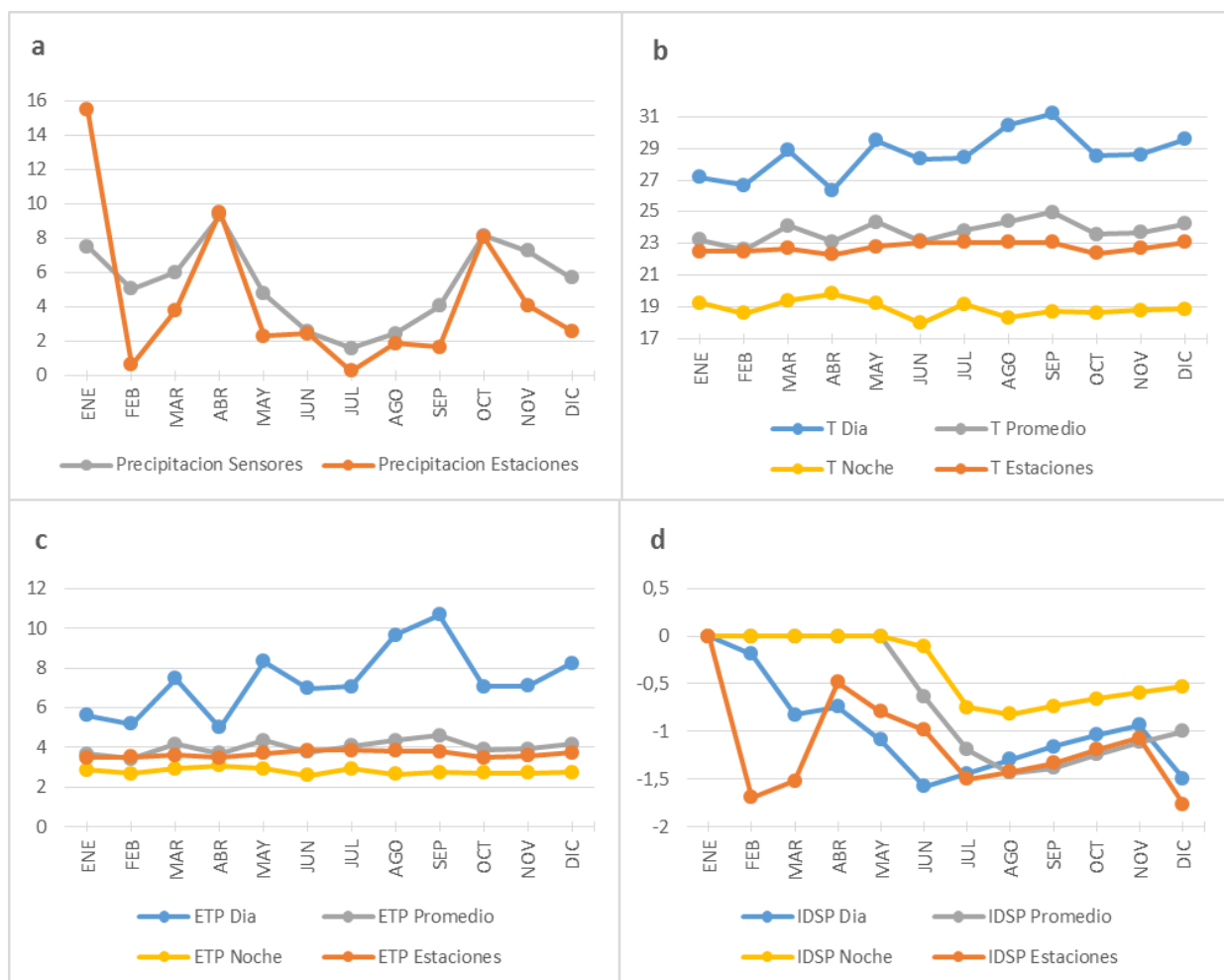


Figura 14. Comparación de variables estación Ortigal

En la Figura 14d se observa que la relación del índice de severidad de sequía de palmer (IDSP) se encuentra en un rango de -2 a 0.5. La tendencia de los datos de IDSP para los 4 tipos, muestran un comportamiento de condiciones normales, sequía incipiente y suave.

Tabla 17. Resultados puntuales estación Jamundí

MES	SENSORES REMOTOS										EST. METEOROLÓGICAS			
	P	Td	Tp	Tn	ETP d	ETP p	ETP n	IDSP d	IDSP p	IDSP n	P	T	ETP	IDSP
ENE	9,512	27,7	22,77	17,85	5,619	3,31	2,441	0	0	0	8,012	22	3,339	0
FEB	7,023	27,99	23,52	19,04	5,997	3,69	2,791	2E-06	0	0	4,22	21,9	3,318	0
MAR	9,705	31,76	25,7	19,65	12,27	4,941	2,991	-0,598	0	0	5,524	22,2	3,46	0
ABR	10,99	28,49	24,6	20,7	6,725	4,327	3,346	-0,536	0	0	12,4	21,8	3,329	0,92
MAY	6,404	27,52	23,96	20,4	5,573	4,005	3,273	-0,481	0	0	3,36	22,4	3,595	0,677
JUN	3,574	32,25	25,98	19,72	13,61	5,21	3,06	-0,571	-0,659	0	0,572	22,7	3,731	-0,517
JUL	2,194	33,24	24,36	15,49	16,13	4,231	1,893	-0,512	-1,136	0	2,112	22,8	3,768	-0,721
AGO	3,33	36,33	27,7	19,08	26,43	6,357	2,851	-0,459	-1,525	0	0,944	22,9	3,79	-0,951
SEP	5,775	33,75	26,32	18,89	17,33	5,349	2,774	-0,412	-1,368	2E-06	1,052	22,9	3,759	-0,988
OCT	9,548	32,16	25,83	19,5	13,12	5,001	2,935	-0,369	-1,227	2E-06	5,828	22,1	3,406	-0,886
NOV	9,206	29,35	24,2	19,04	7,796	4,026	2,779	-0,331	-1,101	1E-06	6,456	22,1	3,383	-0,795

DIC	6,767	28,01	23,43	18,86	5,99	3,633	2,727	-0,297	-0,988	1E-06	5,032	22,2	3,422	-0,713
-----	-------	-------	-------	-------	------	-------	-------	--------	--------	-------	-------	------	-------	--------

La Tabla 17 muestra los resultados puntuales de la estación Jamundí del IDSP con temporalidad mensual. La Figura 15 muestra los comparativos de variables de la estación Jamundí, Donde se relacionan la precipitación, temperatura (T), evapotranspiración potencial (ETP), e índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP) figurados en la Tabla 17.

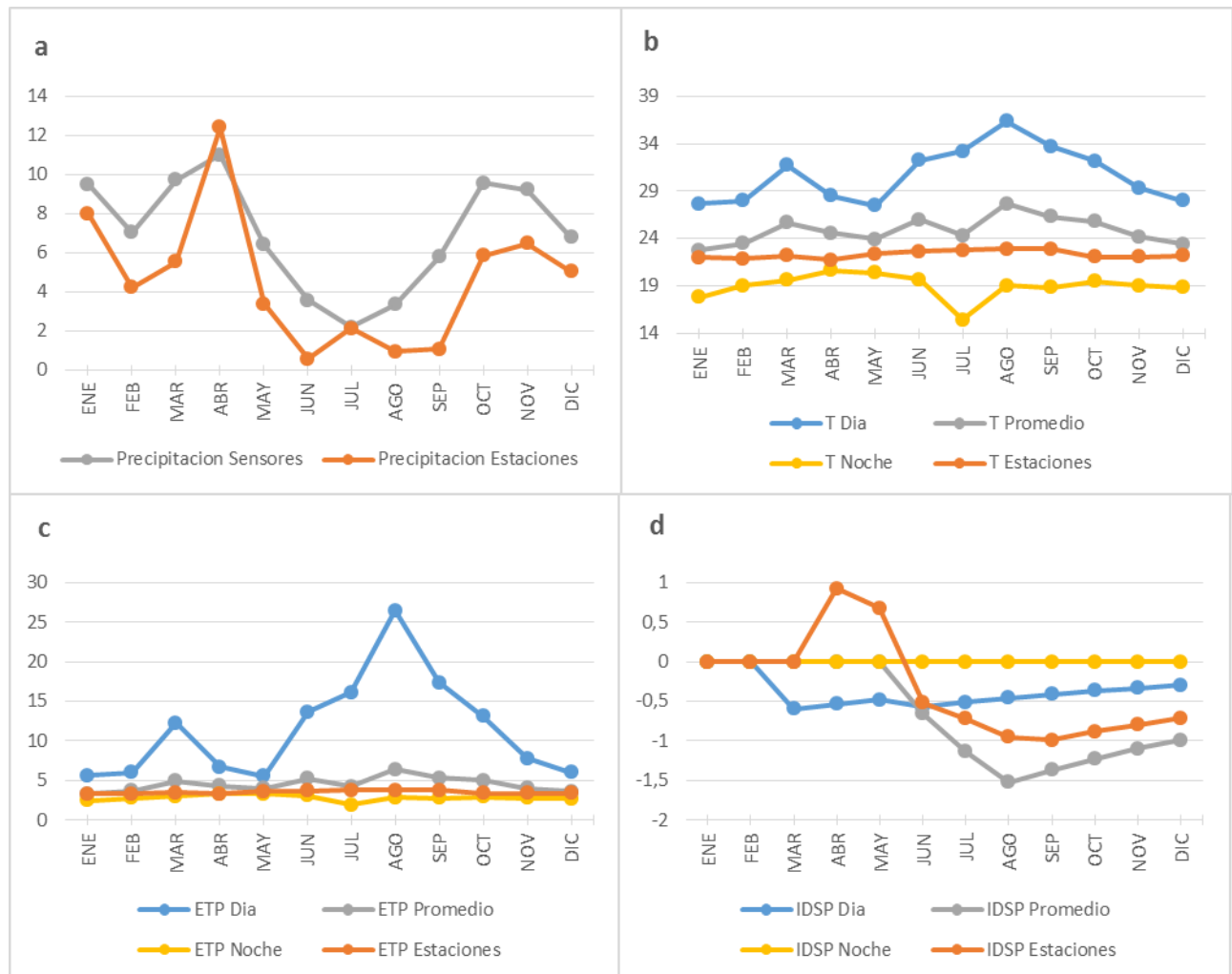


Figura 15. Comparación de variables estación Jamundí

En la Figura 15a se observa que la relación de precipitación se encuentra en un rango de 0 a 14 pul/mes, tanto para los datos de sensores remotos y estaciones meteorológicas. La tendencia de los datos es aparentemente similar.

En la Figura 15b se observa que la relación de temperatura se encuentra en un rango de 14 a 39°C. En la Figura 15c se observa que la relación de la evapotranspiración potencial (ETP) se encuentra en un rango de 0 a 30 pul/mes.

En la Figura 15d se observa que la relación del índice de severidad de sequía de palmer (IDSP) se encuentra en un rango de -2 a 1. La tendencia de los datos de IDSP para los 3 tipos en sensores remotos, muestran un comportamiento de condiciones normales, sequía incipiente y suave, mientras que los de estaciones meteorológicas tiene un comportamiento de condiciones normales, humedad incipiente, sequía incipiente.

Tabla 18. Resultados puntuales estación Candelaria.

MES	SENSORES REMOTOS										EST. METEOROLOGICAS			
	P	Td	Tp	Tn	ETP d	ETP p	ETP n	IDSP d	IDSP p	IDSP n	P	T	ETP	IDSP
ENE	6,716	25,34	21,83	18,31	4,027	3,132	2,699	0	0	0	8,856	23,1	3,629	0
FEB	4,952	27,93	22,77	17,62	6,356	3,548	2,528	-0,651	0	0	1,624	23,3	3,741	-1,129
MAR	6,047	30,51	24,96	19,42	9,652	4,624	3,047	-1,247	0	0	2,848	23,7	3,958	-1,6
ABR	8,374	27,4	15,45	3,5	5,909	1,212	0,129	-1,119	0	0	5,372	23,3	3,799	-0,685
MAY	5,467	28,76	24,57	20,38	7,45	4,49	3,384	-1,67	0	0	4,084	23,7	4,018	-0,614
JUN	2,434	28,59	23,83	19,07	7,267	4,13	2,999	-2,137	-0,661	-0,486	1,028	24	4,178	-1,556
JUL	1,879	29,87	25,12	20,37	8,886	4,783	3,385	-1,917	-1,224	-1,093	0,472	24,2	4,274	-1,665
AGO	2,816	29,8	24,43	19,06	8,749	4,401	2,977	-1,719	-1,354	-1,085	1,088	24,3	4,302	-1,541
SEP	5,121	29,74	23,86	17,98	8,596	4,084	2,65	-1,542	-1,215	-0,973	0,984	24,2	4,216	-1,398
OCT	8,679	29,01	24,7	20,38	7,607	4,468	3,319	-1,384	-1,089	-0,873	6,72	23,3	3,752	-1,254
NOV	6,499	29,8	23,99	18,17	8,558	4,088	2,665	-1,872	-0,977	-0,783	2,388	23,6	3,867	-1,972
DIC	4,803	29,02	23,85	18,68	7,561	4,022	2,805	-1,72	-0,877	-0,702	2,248	23,8	3,962	-2,389



Figura 16. Comparación de variables estación Candelaria

La Tabla 18 muestra los resultados puntuales de la estación Candelaria del IDSP con temporalidad mensual. La Figura 16 muestra los comparativos de variables de la estación Candelaria, Donde se relacionan la precipitación, temperatura (T), evapotranspiración potencial (ETP), e índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP) figurados en la Tabla 18.

En la Figura 16a se observa que la relación de precipitación se encuentra en un rango de 0 a 10 pul/mes, tanto para los datos de sensores remotos y estaciones meteorológicas. La tendencia de los datos es aparentemente similar con una diferencia en el dato de sensores remoto de precipitación, ya que presenta valores más elevados.

En la Figura 16b se observa que la relación de temperatura se encuentra en un rango de 3 a 33°C. En la Figura 16c se observa que la relación de la evapotranspiración potencial (ETP) se encuentra en un rango de 0 a 10 pul/mes.

En la Figura 16d se observa que la relación del índice de severidad de sequía de palmer (IDSP) se encuentra en un rango de -3 a 0,5. La tendencia de los datos de IDSP para los 2 tipos en sensores remotos promedio (línea gris) y noche (línea amarilla). Muestran un comportamiento de condiciones normales, sequía incipiente y suave, mientras que los de estación meteorológica (línea naranja) y sensores remotos día (línea azul) tiene un comportamiento de condiciones normales, sequía incipiente, suave y moderada.

Tabla 19. Resultados puntuales estación Corinto.

	SENSORES REMOTOS										EST. METEOROLOGICAS			
MES	P	Td	Tp	Tn	ETP d	ETP p	ETP n	IDSP d	IDSP p	IDSP n	P	T	ETP	IDSP
ENE	7,493	24,39	21,11	17,83	3,316	2,759	2,457	2E-06	0	0	14,03	22,2	3,339	0
FEB	5,05	25,27	22,06	18,85	3,944	3,16	2,757	2E-06	0	0	4,18	22,2	3,357	0
MAR	6	29,48	24,53	19,58	8,234	4,353	2,991	-0,635	0	0	7,296	22,6	3,549	0
ABR	9,301	27,6	23,39	19,18	6,078	3,813	2,896	-0,569	0	0	9,688	22,2	3,409	1,02
MAY	4,739	30,28	24,67	19,07	9,489	4,495	2,881	-0,628	0	0	5,204	22,9	3,734	0,915
JUN	2,519	27,53	22,96	18,4	6,063	3,646	2,693	-0,875	-0,629	-0,238	6,32	23,3	3,924	0,821
JUL	1,555	26,81	23,32	19,83	5,336	3,809	3,117	-0,894	-1,161	-0,874	0,4	23,8	4,152	-1,613
AGO	2,41	32,47	25,68	18,89	13,15	5,037	2,817	-0,831	-1,521	-0,988	0,796	23,8	4,129	-2,437
SEP	4,051	38,34	28,37	18,4	28,64	6,705	2,653	-0,745	-1,645	-0,886	1,088	24,1	4,237	-2,551
OCT	8,158	27,65	23,55	19,45	6,055	3,843	2,94	-0,669	-1,476	-0,795	6,404	22,8	3,62	-2,289
NOV	7,252	30,75	24,88	19,01	9,943	4,489	2,791	-1,276	-1,324	-0,713	1,628	22,6	3,51	-3,007
DIC	5,667	26,47	22,27	18,08	4,887	3,237	2,529	-1,144	-1,187	-0,64	5,448	22,9	3,638	-2,698

La Tabla 19 muestra los resultados puntuales de la estación Corinto del IDSP con temporalidad mensual. La Figura 17 muestra los comparativos de variables de la estación Corinto, donde se relacionan la precipitación, temperatura (T), evapotranspiración potencial (ETP), e índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP) figurados en la Tabla 19.

En la Figura 17a se observa que la relación de precipitación se encuentra en un rango de 0 a 14 pul/mes, tanto para los datos de sensores remotos y estaciones meteorológicas. La tendencia de los datos es aparentemente similar, con una diferencia en el dato de estación meteorológica de precipitación, ya que presenta valores más elevados al inicio.

En la Figura 17b se observa que la relación de temperatura se encuentra en un rango de 17 a 42°C. En la Figura 17c se observa que la relación de la evapotranspiración potencial (ETP) se encuentra en un rango de 0 a 30 pul/mes.

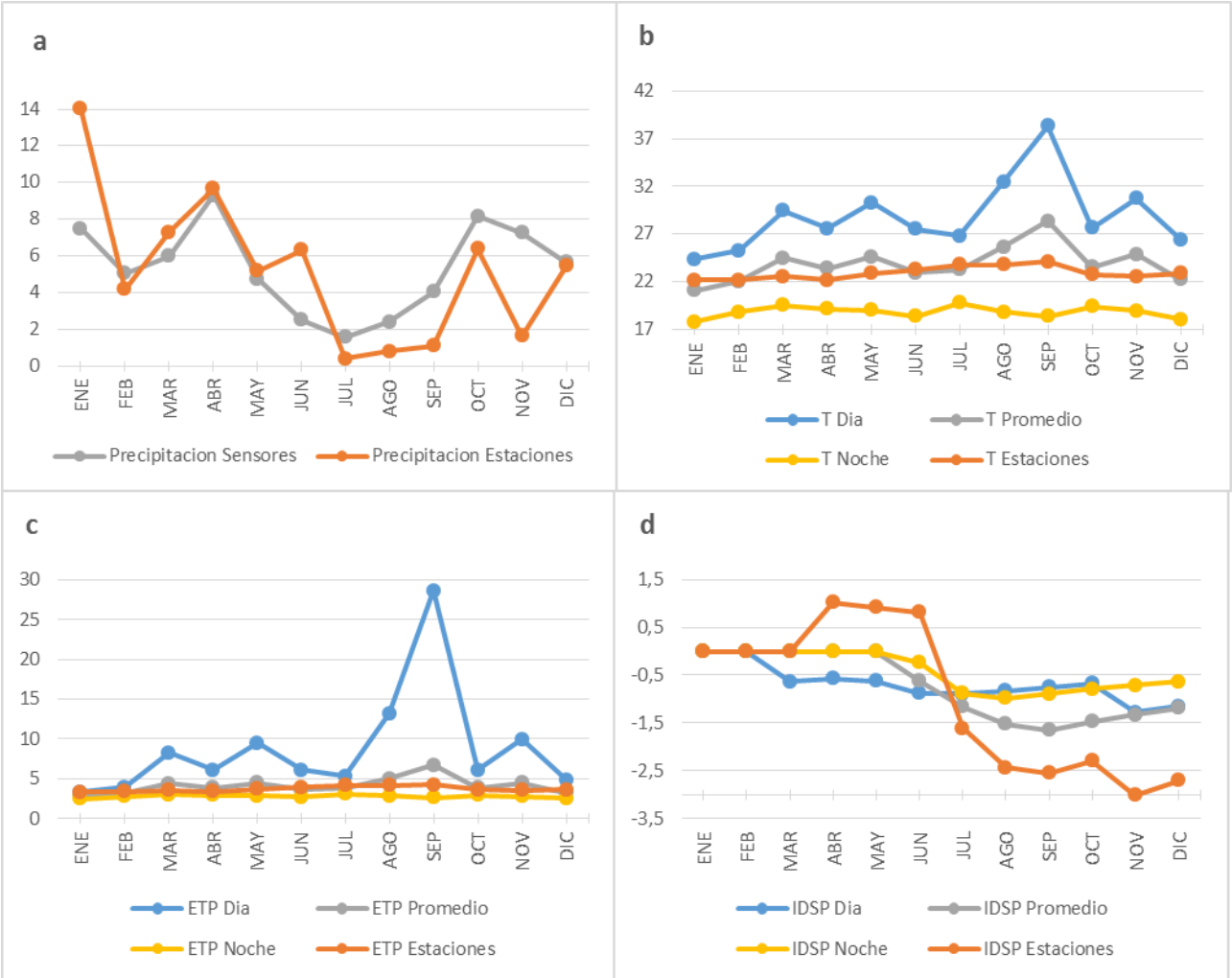


Figura 17. Comparación de variables estación Corinto

En la Figura 17d se observa que la relación del índice de severidad de sequía de palmer (IDSP) en la Figura 17d. Se encuentra en un rango de -3,5 a 1,5. La tendencia de los datos de IDSP para los 3 tipos en sensores remotos, muestran un comportamiento de condiciones normales, sequía incipiente y suave, mientras que los de estaciones meteorológicas tienen un comportamiento de condiciones normales, humedad incipiente, sequía incipiente, suave, moderada y severa.

Tabla 20. Resultados puntuales estación Guachinté

MES	SENSORES REMOTOS										EST. METEOROLÓGICAS			
	P	Td	Tp	Tn	ETP d	ETP p	ETP n	IDSP d	IDSP p	IDSP n	P	T	ETP	IDSP
ENE	9,512	26,34	23,17	20	4,453	3,528	3,031	0	0	0	9,452	23,3	3,721	0
FEB	7,023	27,45	23,34	19,22	5,57	3,628	2,812	0	0	0	6,484	23,3	3,742	0

MAR	9,705	30,37	24,44	18,51	9,563	4,226	2,624	0	0	0	7,76	23,6	3,91	0
ABR	10,99	26,06	22,61	19,16	4,296	3,335	2,837	0	0	0	9,148	23,1	3,705	0,977
MAY	6,404	26,84	23,62	20,4	5,056	3,854	3,244	2E-06	0	0	4,98	23,6	3,969	0,877
JUN	3,574	28,22	23,58	18,94	6,608	3,844	2,798	-0,538	-0,318	0	2,236	23,8	4,078	-0,099
JUL	2,194	29,02	23,9	18,77	7,65	4,003	2,744	-1,172	-0,946	-0,479	0,656	24,1	4,223	-1,069
AGO	3,33	32,56	25,77	18,97	13,98	5,049	2,788	-1,052	-1,336	-0,43	4,568	24,2	4,251	-0,959
SEP	5,775	41,04	29,93	18,83	47,15	8,036	2,723	-0,943	-1,638	-0,386	1,712	24,4	4,318	-1,732
OCT	9,548	31,94	25,72	19,5	12,44	4,946	2,904	-0,846	-1,469	-0,346	7,664	23,6	3,894	-1,553
NOV	9,206	31,34	25,24	19,14	11,18	4,628	2,777	-0,759	-1,318	-0,31	5,1	23,7	3,914	-1,393
DIC	6,767	29,23	24,51	19,8	7,725	4,22	2,974	-0,681	-1,182	-0,278	5,932	23,8	3,962	-1,25

La Tabla 20 muestra los resultados puntuales de la estación Guachinté del IDSP con temporalidad mensual. La tabla se encuentra dividida en dos secciones: sensores remotos y estaciones meteorológicas. La sección de sensores remotos muestra variables de entrada como la precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial; y de cómo variable de salida IDSP, para una temporalidad de (día, promedio y noche), mientras que la sección de estaciones meteorológicas cuenta con estas mismas variables no se analiza la información en la temporalidad (día, promedio y noche) ya que no se cuenta con este tipo de datos.

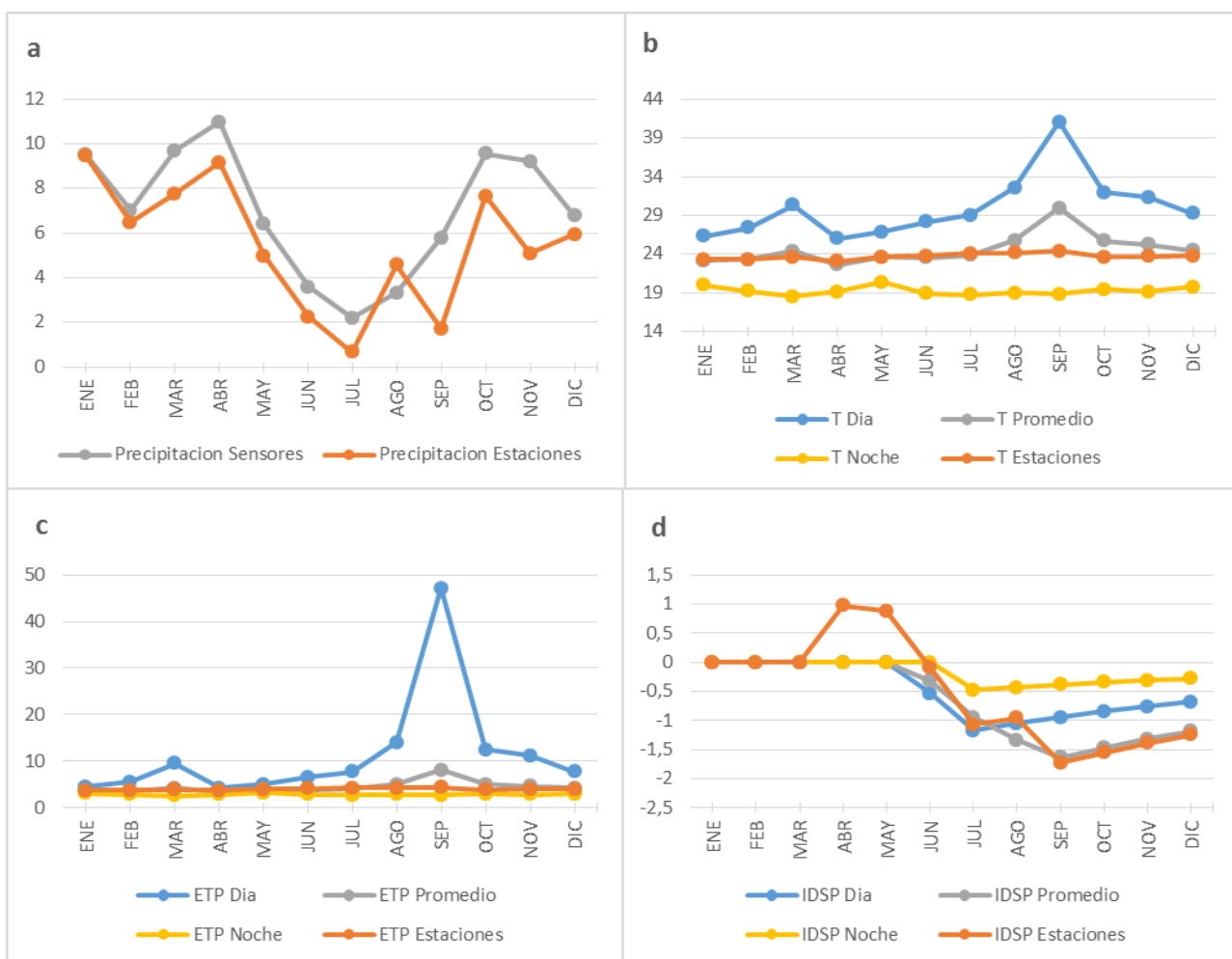


Figura 18. Comparación de variables estación Guachinté

La Figura 18 muestra los comparativos de variables de la estación Corinto, Donde se relacionan la precipitación, temperatura (T), evapotranspiración potencial (ETP), e índice de severidad de sequía de Palmer (IDSP) figurados en la Tabla 20.

En la Figura 18a se observa que la relación de precipitación se encuentra en un rango de 0 a 12 pul/mes, tanto para los datos de sensores remotos y estaciones meteorológicas. La tendencia de los datos es aparentemente similar.

En la Figura 18b se observa que la relación de temperatura se encuentra en un rango de 14 a 34°C. En la Figura 18c se observa que la relación de la evapotranspiración potencial (ETP) se encuentra en un rango de 0 a 50 pul/mes.

En la Figura 18d se observa que la relación del índice de severidad de sequía de palmer (IDSP) se encuentra en un rango de -2,5 a 1,5. La tendencia de los datos de IDSP para los 3 tipos en sensores remotos, muestran un comportamiento de condiciones normales, sequía incipiente y suave, mientras que los de estaciones meteorológicas tienen un comportamiento de condiciones normales, humedad incipiente, sequía incipiente y suave.

De manera general se observó que en todas las estaciones, los valores del IDSP a comienzos de año tomaron valores iguales o cercanos a cero en día, promedio y noche, tanto para sensores remotos como para los valores de estaciones meteorológicas. Además, el comportamiento del índice se empieza a correlacionar entre ellos aproximadamente desde mediados de año en adelante.

Esto es debido a que el índice, al ser aplicado por primera vez en una zona de estudio, necesita ajustarse a las condiciones iniciales del modelo, ya que éste es usado para series de tiempo relativamente largas (hablando de años), mientras que en este trabajo se proyectó para un año. Tomamos como ejemplo la estación Yotoco (Ver Figura 9), en donde se observó que para el IDSP día se empezó a ajustar desde el mes de Febrero y el IDSP promedio desde el mes de Junio, mientras que para el IDSP noche, no alcanzó a ajustarse correctamente, tomando valores muy bajos cercanos a cero. Se observó que para el IDSP día se ajustó correctamente en Febrero precisamente porque en ese mes la ETP día fue de 6,38 pulg. Superando la precipitación de 5,552 pulg. Para el IDSP promedio se observó la misma situación pero desde el mes de Junio, en donde la ETP promedio resultó en 4,418 superando la precipitación de 4,378, mientras que para años anteriores los valores de ETP promedio no lograron superar la precipitación. En el caso de IDSP noche los valores resultan en ceros desde Enero hasta Junio, mientras que de Julio hasta Diciembre toma valores cercanos a cero. Como se observó que la ETP noche no llegó a superar la precipitación en ningún mes del año 2012, pero el IDSP noche tomó valores cercanos a cero a mitad de mes, es necesario resaltar que ésta no es la única condición en el modelo de Palmer, ya que existen otras condiciones como se denota en el marco teórico. Sin embargo, la condición de que la ETP sea mayor que la precipitación, es una primera aproximación para explicar el ajuste del modelo en los meses iniciales. Dicha condición resulta porque no se alcanza a evaporar las lluvias presentes en el mes, generando un estado de humedad. Esta situación se presentó en todas las estaciones tanto para sensores remotos, como para estaciones meteorológicas.

Adicionalmente, en la estación Guachinté se presentó un valor atípico para el mes de Septiembre (Ver Figura 17) en la ETP día de 47,15pulg., el cual resultó ser un valor excesivamente alto con respecto a los otros meses. Lo mismo sucedió en la estación Corinto en el mes de Septiembre en el cual la ETP día tomó un valor de 28,64 pulg. y en la estación Jamundí (Ver Figura 15) en el mes de Agosto la ETP día tuvo un valor de 26,43 pulg. De la misma forma, en la estación Candelaria (Ver Figura 16) este valor atípico se presentó pero ahora en la ETP noche en el mes de Abril con un valor de 0,129 siendo un valor bajo comparado a los otros meses.

Revisando la temperatura día en dichas estaciones se observó que de la misma forma, los valores son exagerados en los meses que se presentan dichos valores atípicos en la ETP. Ejemplo de ello la estación Guachinté en mes de Septiembre la temperatura día tomó un valor de 41,04°C, lo cual corresponde a un valor excesivo de temperatura. De la misma forma en la estación Candelaria se observó en la temperatura noche del mes de Abril un valor de 3,5°C, siendo este un valor muy bajo de temperatura. Estos valores atípicos corresponden a datos erróneos del sensor en el momento de captura de los datos de temperatura.

Se detalló por medio de los gráficos de relación entre ETP que, a manera general, la ETP día toma valores muy altos, a diferencia de la ETP promedio y noche, los cuales tienden a asemejarse al comportamiento de la ETP calculada en estaciones meteorológicas.

Este comportamiento es debido al modelo de ETP propuesto por Thornthwaite, en el que se incluye una sumatoria del índice de calor anual, lo que hace que los valores tiendan a crecer significativamente. Es por ello que en todos los casos de temperatura día, los valores de ETP día tienen ese comportamiento.

Ahora bien, a manera general se afirma que a partir del mes de Junio del año 2012 empezó a aumentar la sequía significativamente en todas las estaciones, tomando valores de -3,007 en el mes de Noviembre por datos de estaciones meteorológicas en Corinto, un valor de -2,162 en el mes de Junio en IDSP día en la estación El Tiple, un valor de -1.525 en el mes de Agosto en IDSP promedio en la estación Jamundí, esto como valores más altos presentados a nivel general.

En cuanto a valores de humedad, no se presentaron valores mayores a 1,031 que fue el caso de la estación Río Frío en el mes de Abril, debido a que el año de estudio seleccionado estuvo fuertemente afectado por la sequía. Es por esa razón que los valores de IDSP en ese año tienden a dar relativamente secos en comparación a la humedad.

7.1. Validación

Pues bien, como medida de validación de los datos se utilizó el coeficiente de correlación lineal de Pearson, el cual hace referencia a la naturaleza de la relación entre distintas variables, es decir, es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente. Existe una escala para interpretar el coeficiente de correlación dada por algunos autores (Castejón O., 2011):

Tabla 21. Escala de interpretación del Coeficiente de Correlación de Pearson.

RANGO	SIGNIFICADO
0,00 a 0,29	Bajo
0,30 a 0,69	Moderado
0,70 a 1,00	Alto

Fuente: Castejón O., 2011

Se comparó la información obtenida mediante sensores remotos con los obtenidos mediante estaciones meteorológicas. Las variables utilizadas en la comparación fueron precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial y el índice de Palmer.

Tabla 22. Coeficiente de correlación de variables en estación La Paila

COEFICIENTE DE CORRELACION SENSORES VS ESTACIONES			
	DIA	PROMEDIO	NOCHE
P	0,744465286		
T	0,394787831	0,206882169	-0,48132843
ETP	0,400376472	0,261526331	-0,340033209
IDSP	0,828898282	#¡DIV/0!	0,211601941

En la Tabla 22 que corresponde a la estación La Paila se observó que la correlación del IDSP en la imagen promedio es nula, debido a que los datos de IDSP promedio para los doce meses son iguales a cero, razón por la cual no se pudo llevar a cabo la correlación. Además se observó bajas correlaciones en las imágenes de Temperatura promedio, ETP promedio e IDSP noche, mientras que en las imágenes de IDSP día se presentó una alta correlación de 0,82. En cuanto a la variable de precipitación se observó una alta correlación de las imágenes con respecto al dato de la estación meteorológica.

Tabla 23. Coeficiente de correlación de variables en estación Rio Frío

COEFICIENTE DE CORRELACION SENSORES VS ESTACIONES			
	DIA	PROMEDIO	NOCHE
P	0,668001885		
T	0,460147701	0,370850121	-0,222559604
ETP	0,521699755	0,507399423	-0,008267374
IDSP	0,623990014	0,663856935	-0,827675124

De igual manera, en la Tabla 23 se presentaron bajas correlaciones en las imágenes de noche de Temperatura y ETP con valores de -0,22 y -0,008 respectivamente para la estación Rio Frío. En este caso, en las imágenes promedio y día se presentaron correlaciones moderadas. Por otra parte, se presentó una alta correlación inversa en IDSP noche con valor de -0,82.

Tabla 24. Coeficiente de correlación de variables en estación Yotoco

COEFICIENTE DE CORRELACION SENSORES VS ESTACIONES			
	DIA	PROMEDIO	NOCHE
P	0,702761127		
T	0,436693816	0,517282262	0,437745272
ETP	0,431155575	0,518431439	0,466222695
IDSP	0,378726103	0,599091119	-0,835714864

Ahora bien, en la Tabla 24 concerniente a la estación Yotoco se presentaron correlaciones moderadas en las imágenes día, promedio y noche, excepto para la variable IDSP noche en la que se presentó una alta correlación inversa con un valor de -0,83. La precipitación presentó una alta correlación con valor de 0.70.

Tabla 25. Coeficiente de correlación de variables en estación Amaime

COEFICIENTE DE CORRELACION SENSORES VS ESTACIONES			
	DIA	PROMEDIO	NOCHE
P	0,867465309		
T	0,278981876	0,135624758	-0,148460738
ETP	0,242163634	0,21995339	0,011429134
IDSP	0,641822327	0,114933026	0,112915778

En la Tabla 25 de la estación Amaime se pudo observar bajas correlaciones en todas las imágenes de noche, promedio y día, excepto la imagen de IDSP día que tuvo un valor moderado de correlación de 0,64 y en la de precipitación que obtuvo una alta correlación con un valor de 0,86.

Tabla 26. Coeficiente de correlación de variables en estación San Marcos

COEFICIENTE DE CORRELACION SENSORES VS ESTACIONES			
	DIA	PROMEDIO	NOCHE
P	0,734748911		
T	0,380221792	0,292542327	0,014648035
ETP	0,342613405	0,339244081	0,130095519
IDSP	0,534450216	0,510236058	0,498894235

En la estación San Marcos referente a la Tabla 26, se presentó bajas correlaciones en las imágenes de noche de temperatura y evapotranspiración potencial, con valores de 0,01 y 0,13 respectivamente. Además en la temperatura promedio que se obtuvo una correlación de 0,29 lo que denota una baja correlación. Seguido a ello, en las demás se presentaron correlaciones moderadas y en la variable precipitación se presentó una alta correlación con valor de 0,73.

Tabla 27. Coeficiente de correlación de variables en estación Rozo

COEFICIENTE DE CORRELACION SENSORES VS ESTACIONES			
	DIA	PROMEDIO	NOCHE
P	0,752114962		
T	0,541901626	0,652445781	0,265447382
ETP	0,469814943	0,612945373	0,364542858
IDSP	0,832891072	0,42473987	0,372313486

Para la estación Rozo en la Tabla 27, solo se presentó un valor bajo de correlación en la imagen de temperatura noche con un valor de 0,26. Además se presentó un valor de 0,83 para la imagen de IDSP día, lo que denota un alto valor de correlación al igual que la precipitación con un valor de 0,75. En general las demás variables presentaron una correlación moderada.

Tabla 28. Coeficiente de correlación de variables en estación El Tiple

COEFICIENTE DE CORRELACION SENSORES VS ESTACIONES			
	DIA	PROMEDIO	NOCHE
P	0,823933876		
T	0,609457318	0,571500245	-0,359259832
ETP	0,635908412	0,6333212	-0,141461256
IDSP	0,446237044	0,852052593	0,851922424

En la Tabla 28 que corresponde a la estación El Tiple solo se presentó una baja correlación inversa en las imágenes noche de ETP con un valor de -0,14, mientras que se presentaron altas correlaciones en las imágenes de IDSP promedio y noche con valores de 0,85 en ambas, además de la precipitación que se obtuvo un valor alto de correlación de 0,82.

Tabla 29. Coeficiente de correlación de variables en estación Ortigal

COEFICIENTE DE CORRELACION SENSORES VS ESTACIONES			
	DIA	PROMEDIO	NOCHE
P	0,729485058		
T	0,736569711	0,609163788	-0,480042381
ETP	0,687201051	0,628291576	-0,300269616
IDSP	0,45147387	0,440405075	0,455429284

Para la estación Ortigal en la Tabla 29 no se presentaron bajas correlaciones, puesto que la más baja fue de -0,3 en ETP noche, lo que es considerado como una correlación moderada. Se presentó una alta correlación en las imágenes de temperatura día con un valor de 0,73 y en precipitación con un valor de 0,72.

Tabla 30. Coeficiente de correlación de variables en estación Jamundí

COEFICIENTE DE CORRELACION SENSORES VS ESTACIONES			
	DIA	PROMEDIO	NOCHE
P	0,864473991		
T	0,787355476	0,633789083	-0,348800248
ETP	0,78293176	0,668984044	-0,228805799
IDSP	-0,014395904	0,898534559	-0,594285338

En la Tabla 30 de la estación Jamundí, las correlaciones más bajas se presentaron en ETP noche e IDSP día con valores de -0,22 y -0,01 respectivamente. Un valor alto de correlación se presentó en IDSP promedio de 0,89, lo cual expresa que aproximadamente un 90% de los datos se correlacionaron correctamente. Además en temperatura día y precipitación se presentaron valores altos de correlación.

Tabla 31. Coeficiente de correlación de variables en estación Candelaria

COEFICIENTE DE CORRELACION SENSORES VS ESTACIONES			
	DIA	PROMEDIO	NOCHE
P	0,765970732		
T	0,69495466	0,484304399	0,343147451
ETP	0,676329133	0,499682517	0,335892811

IDSP	0,711905192	0,616855257	0,609981522
------	-------------	-------------	-------------

Para la estación Candelaria, como se muestra en la Tabla 31 no se presentaron valores bajos de correlación, sino valores moderados en gran mayoría. Los valores más altos estuvieron en precipitación e IDSP día con valores de 0,76 y 0,71 respectivamente.

Tabla 32. Coeficiente de correlación de variables en estación Corinto

COEFICIENTE DE CORRELACION SENSORES VS ESTACIONES			
	DIA	PROMEDIO	NOCHE
P	0,632336919		
T	0,657015255	0,657357732	0,072903667
ETP	0,626789555	0,663920839	0,209934601
IDSP	0,568267444	0,899734242	0,89235239

En la Tabla 32 se presentaron bajas correlaciones en las imágenes noche de temperatura y evapotranspiración con valores de 0,07 y 0,2 respectivamente en la estación Corinto y moderadas en el día y promedio. Además, se presentaron altas correlaciones en IDSP promedio y noche con valores de 0,89 en ambas.

Tabla 33. Coeficiente de correlación de variables en estación Guachinté

COEFICIENTE DE CORRELACION SENSORES VS ESTACIONES			
	DIA	PROMEDIO	NOCHE
P	0,86293447		
T	0,767112504	0,752439505	-0,385592485
ETP	0,625298933	0,670897526	-0,307400417
IDSP	0,848867173	0,931689879	0,857066425

En la Tabla 33 correspondiente a la estación Guachinté no se presentaron bajas correlaciones, pues solo se presentaron dos correlaciones moderadas en ETP día y promedio, mientras que las demás tuvieron una alta correlación.

A manera general, se puede afirmar que la precipitación obtenida en sensores remotos correlacionó de manera correcta los datos con respecto a las estaciones meteorológicas, con unos coeficientes por arriba del 60%. Aunque en ciertos casos las precipitaciones de sensores difieren mucho de las precipitaciones en estaciones, este método no deja de ser un buen medidor de esta variable.

En cuanto a los valores de temperatura, se tienen correlaciones muy bajas en las imágenes de noche, mientras que en las de promedio y día mejoran considerablemente la correlación.

Con estos resultados se podría afirmar que es recomendable utilizar solamente las imágenes de temperatura día ya que son las que mejor se correlacionan. No obstante, se debe tener en cuenta el siguiente criterio: las imágenes de temperatura superficial del sensor Modis Terra son capturadas a una misma hora, cercano a las 4:00 pm (hora local) en el día y a las 4:00 a.m. en la noche, es decir, la imagen obtenida tendrá la temperatura de ese momento justo. Contrario a esto, las estaciones meteorológicas capturan información constantemente tanto en el día como

en la noche, y con toda esta información lo que se hace es promediarlos y se obtienen los valores que son usados en este trabajo. Es por esto que no se obtuvo una buena correlación en la noche, puesto que en la noche los valores de temperatura son muy bajos. Por ello es necesario utilizar las imágenes promediadas de temperatura, ya que si se examinan los gráficos de relación se observa que la temperatura promedio de sensores es la que obtiene valores más cercanos a la temperatura de estaciones meteorológicas. Esto también explica las correlaciones entre ETP, ya que estos dos están directamente relacionados.

Ahora bien, para el caso del IDSP se seleccionaron los valores más altos de la correlación obtenida y se desarrolló un gráfico de barras para observar el comportamiento en ellas.

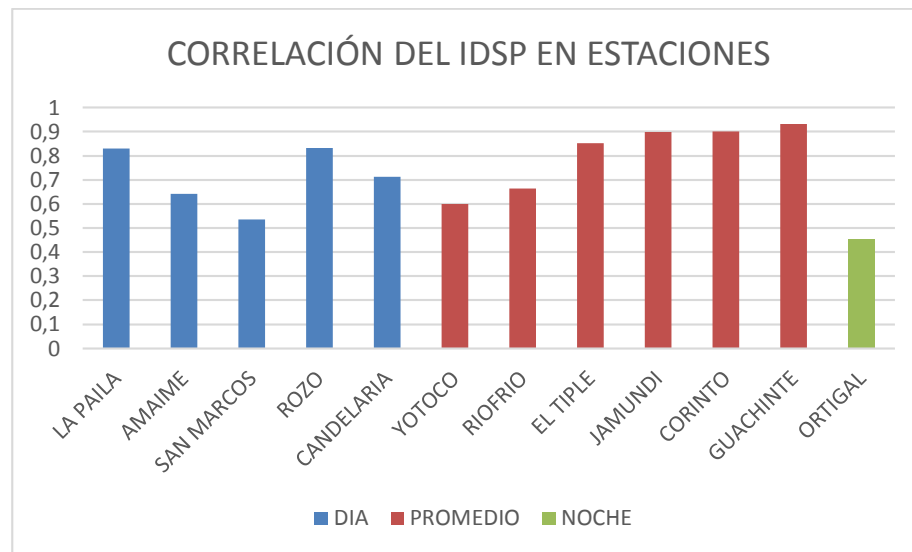


Figura 19. Correlaciones más altas del IDSP en sensores vs estaciones

De esto se pudo observar que 6 de 12 estaciones tuvieron las correlaciones más altas con las imágenes de promedio, y no solo eso, sino que 4 de esas 6 estaciones las correlaciones estuvieron por arriba del 85%. Seguido a ello, 5 estaciones se correlacionaron mejor con las imágenes de día, aunque solo 3 de ellas tuvieron valores por encima del 70%. En cuanto a noche, solamente una estación tuvo la mejor correlación con el IDSP noche, además de que estuvo por debajo del 50% en la correlación.

La estación en la que se obtuvo la mejor correlación fue en la estación Guachinté, pues tanto para día, promedio y noche la correlación superó el 80%, mientras que la estación con las más bajas correlaciones en las tres imágenes fue Ortigal, ya que las tres presentaron una correlación por debajo del 50%.

Las bajas correlaciones que se presentaron en el IDSP, se debió a la situación sobre la temperatura pues en las imágenes existen ciertos vacíos, lo que altera el cálculo del índice debido a que es acumulativo mes a mes. Además de la precipitación, es necesario recalcar que estas imágenes poseen una baja resolución espacial (5 kilómetros por pixel) a comparación de las imágenes de temperatura (1 kilómetro por pixel); es decir, un pixel de precipitación abarca

una gran parte del terreno, por tanto no va a resultar tan detallado, pues se aplica el valor de precipitación a todo ese terreno que cubre.

8. DISCUSIÓN

La comparación de los datos de temperatura obtenida mediante el sensor Modis con los datos obtenidos en estaciones meteorológicas, permitió explicar la relación que hay entre ellas. En esa medida, se presentó una estrecha correlación entre ambas, lo que permitió utilizar los datos de temperatura del sensor Modis para el cálculo del índice, lo que representa una ventaja sobre el método tradicional el cálculo de temperaturas en sitios en donde no se cuenta con una buena cobertura de estaciones meteorológicas, como lo plantea Castro I.R. (2009). Un estudio similar se realizó por Recondo C. et al (2011), en el que presentan los resultados de las correlaciones entre la temperatura del aire (T_a) y la temperatura superficial terrestre (LST) obtenida a partir de varios algoritmos MODIS globales: los algoritmos LST1, LST2 y LST3 de Sobrino et al. (2003) y los productos MOD11 y LST IMAPP, mostrando una mejor correlación en el producto MOD11 sobre los demás.

Al detallar los gráficos de comparación de variables de temperatura, se pudo notar que en todos los casos, las imágenes de día sobreestimaron los valores de estaciones meteorológicas, mientras que las imágenes de noche lo subestimaron, como lo sucedido en un caso de estudio en la región europea (Alonso J. et al, 2013).

Por otro lado, las imágenes de temperatura promedio presentaron un comportamiento similar al de las estaciones. Sin embargo, en algunos casos este promedio se vio afectado por los vacíos presentes en las imágenes e incluso por la presencia de valores atípicos, lo que afecta directamente el cálculo de la evapotranspiración potencial. Es por ello que Alonso J. et al (2013), recomiendan la eliminación de esos valores atípicos, mediante las llamadas “banderas de calidad” formuladas por el equipo de Modis eliminando aquellos píxeles que se indicaban no válidos, nulos o afectados gravemente por errores de estimación de temperatura ($>3^{\circ}\text{C}$), nubes o agua. Cabe decir que existen otras formas de eliminación de valores atípicos, como la presentada en la metodología propuesta por Castro I.R. (2009), en el que se eliminaron los datos erróneos del sensor y algunos datos atípicos utilizando su identificación sobre los valores que difirieron 1.5 veces del cuartil más próximo con respecto a los datos de temperatura en terreno.

Ahora bien, la precipitación de sensores remotos (TRMM) presentó un comportamiento similar al de las estaciones meteorológicas, aunque en algunos meses variaron en cierta manera, principalmente a finales de año. La correlación presentó valores entre 0,63 y 0,86, lo que denota unas correlaciones entre moderada y alta. Estos valores encontrados son del orden de los medidos en la región de estudio de Sierra, Oriente y Ecuador con correlaciones de 0,75, 0,78 y 0,81, aunque un poco bajos comparado a la región de Costa con una correlación de 0,9 (Castro E.S., 2014), lo cual es esperado, puesto que en las tres regiones (Sierra, Oriente y Ecuador) se presentan características similares en cuanto a característica del sitio y en cuanto precipitación con respecto al Valle del Cauca; es decir, los periodos lluviosos se presentan entre Marzo-Abril y un segundo pico entre Octubre-Diciembre, a diferencia de la región Costa que presenta solo

un periodo lluvioso que es de Diciembre hasta Mayo. Por otra parte, se observó que las correlaciones presentadas en este estudio son algo superiores a los obtenidos por Brizuela A.B. et al (2014), en donde se obtuvo valores de correlación entre 0,58 y 0,82 para precipitación mensual de la TRMM.

Por otra parte, a manera general, la evapotranspiración presentó valores de correlación moderados en día y promedio, mientras que en las imágenes de noche la mayoría presentó valores bajos. Un estudio similar se llevó a cabo en las colinas Taita entre Kenia y Transilvania (Maeda E. E., et al 2011), en el que se evaluó la correlación del modelo de ETP de Thornthwaite y se obtuvo un valor de 0,66. El sitio presenta características similares, pues es una zona dedicada a la producción agrícola y está situado en una llanura, lo que explica un comportamiento similar a la evapotranspiración presente en el valle geográfico del Valle del Cauca.

En cuanto al IDSP, se observó en primer lugar que en los primeros meses tomaron valores iguales a cero mientras se ajusta el índice. Este evento sucedió también en los proyectos desarrollados por Vicente J. (2014) y Boletta P. (2001) en el que el índice toma valores iguales o cercanos a cero en los primeros meses de estudio.

En segundo lugar, el IDSP es un índice muy completo, ya que por sí solo puede explicar muchos fenómenos hidrológicos, debido a la cantidad de variables intermedias que utiliza para su cálculo, como las pérdidas, recargas y el contenido de humedad en el suelo, el escurrimiento, entre otras. Por esa razón, no es un índice que requiera de otras variables para poder llevar a cabo un buen análisis sobre una zona de estudio. Junto a esto, la implementación del índice mediante sensores remotos permite obtener mapas en las que se puede analizar cada sitio, incluso aquellos en los que no existe cobertura de estaciones meteorológicas. Este hecho responde a las necesidades de otras metodologías como la propuesta por Vicente J. (2014), en el que requieren la implementación de variables externas como el "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI) y del índice "Normalized Difference Water Index" (NDWI), con el fin de suplir la escasa densidad de estaciones meteorológicas. Sin embargo, los resultados presentados en esa investigación son cualitativos y no cuantitativos, y por lo tanto, requieren, de evaluaciones complementarias de otras metodologías.

Además, la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo AWC permite evaluar el comportamiento de varios cultivos, si se cuenta con información de texturas y profundidad de las raíces en la zona de estudio. Esto asemejaría a una de las ventajas de los índices de vegetación, pues el NDVI responde a cambios de cantidad de clorofila en el píxel, mientras que el NDWI responde a cambios en el contenido de humedad del píxel, que están condicionados por los cultivos presentes en la zona de estudio, y los principales son girasol, algodón, soja y maíz. No obstante, debido a la resolución espacial de los productos del sensor MODIS utilizados en este proyecto y las características de cobertura de los cultivos, un píxel podrá contener varios tipos de cultivos, generando así una dificultad para determinar el comportamiento de un cultivo en específico.

En ese orden de ideas, los mapas generados en este estudio permiten conocer el valor del IDSP en cada píxel, por lo que ésta metodología es muy eficaz para evaluar a manera local las zonas

más afectadas por una sequía. A diferencia de ello, existen metodologías como la implementada por Choi M. et al (2012), en el que utilizaron a manera de validación los productos de IDSP de la NOAA que son calculados solamente para Estados Unidos. Dichos productos son calculados a partir de estaciones meteorológicas, los cuales son luego divididos en áreas porcentuales. No obstante, dichas áreas llegan a ser muy extensas (aproximadamente se dividen en 5 zonas por Estado), en la cual la variabilidad de los datos es alta. Por ende, este estudio plantea una metodología que permite corregir esa variabilidad teniendo en cuenta toda el área de estudio y no un dato puntual que sea interpolado.

Qiaozhen M., et al (2013), implementaron un Índice de Severidad de Sequía (DSI por sus siglas en inglés) a nivel mundial, el cual se comparó con el Índice de Severidad de Sequía de Palmer y una estimación de la vegetación de Producción Primaria Neta (NPP por sus siglas en inglés) del sensor MODIS. El IDSP se calculó mediante la ETP propuesta por Thornthwaite. Los datos de temperatura mensual del aire fueron obtenidos del Centro de Predicción Climática NCEP–DOE II, los cuales se suavizaron a medio grado de resolución espacial. El mismo proceso se llevó a cabo en la precipitación mensual utilizando el método desarrollado por Chen et al (2002). Los resultados mostraron una alta correlación en sitios donde las estaciones son relativamente densas, mientras que en las zonas donde los pluviómetros y estaciones son escasos las correlaciones fueron bajas. Además, generaron un mapa de correlación espacial a nivel mundial, con lo que demostraron las incertidumbres en los datos de reanálisis y por lo tanto los índices de sequía calculados, como el IDSP. No obstante, la ventaja de aplicar la metodología descrita en este trabajo es que no requiere de datos de estaciones meteorológicas, ya que la información que se requiere para el cálculo del IDSP es netamente de sensores remotos, con excepción de la capacidad total de almacenamiento de agua en el suelo (AWC) que requiere de un estudio de las texturas del suelo.

Ahora bien, Yan, H. et al (2014) implementaron el Índice de Severidad de Sequía de Palmer mediante distintos cálculos de la evapotranspiración, dentro de los que se encuentran la evapotranspiración total basado índice de área foliar (ARTS E0) y otras tres metodologías de evapotranspiración desarrolladas por Thornthwaite, Allen y Penman-Monteith. Para ello se utilizaron datos del satélite MERRA de la Nasa, datos de precipitación de la Unidad de Investigación del Clima (CRU por sus siglas en inglés), datos del índice de área foliar del GIMMS and Global Land Surface Satellite y datos del suelo de ISLSCP II Global Gridded. Los resultados muestran que el IDSP calculado con la ETP de Thornthwaite es más sensible al fenómeno de la sequía, por lo que se recomienda esta metodología para estudios de monitoreo y evolución de la sequía, a diferencia de la ETP ARTS E0, Allen y Penman-Monteith que son más sensibles a la humedad.

9. CONCLUSIONES

La aplicación del Índice de Severidad de Sequía de Palmer mediante técnicas de sensores remotos es una metodología que promete buenos resultados, ya que permite observar, analizar y evaluar el comportamiento de la sequía a través del tiempo en una zona determinada. Esto mejora en gran manera la forma tradicional de su cálculo, la cual es partir de datos de estaciones

meteorológicas, puesto que es posible calcularlo incluso en zonas en donde no se cuenta con información de estaciones. De esta manera, se puede afirmar que es posible la implementación de esta metodología para una serie de tiempo en años.

Los mapas generados del índice de Palmer a partir de imágenes de sensores remotos son una herramienta muy eficaz, ya que permite obtener información meteorológica de una zona de estudio, y de esta manera, se puede analizar los procesos hidrológicos que ocurren en un determinado cultivo.

La implementación de imágenes de temperatura superficial terrestre es una herramienta muy útil que permite reemplazar los datos de temperatura del aire en cierta manera (Recondo C. et al, 2011), pues el índice de Palmer evalúa los fenómenos que ocurren en el suelo, como la recarga, pérdida y humedad del suelo. De esta forma, el comportamiento de la temperatura superficial se asemeja a la temperatura del aire, la cual es requerida para el cálculo de la evapotranspiración potencial.

La buena correlación encontrada en las imágenes de precipitación de la TRMM comparada los datos de estaciones muestran la efectividad de usar esta información para este tipo de estudios, puesto que el cálculo de la precipitación con otras variables resulta ser muy complejo, y para la magnitud de este trabajo, se saldría de proporciones. La ventaja que ofrece es que se puede obtener la precipitación de forma espacial, lo que facilita el cálculo de IDSP mediante esta metodología. Se espera que se pueda obtener de alguna manera las imágenes de precipitación con una mejor resolución espacial, pues siendo ésta variable muy útil en aspectos hidrológicos, sería un gran aporte no solo a los estudios desarrollados a partir de sensores remotos, sino a entidades que manejan este tipo de información como lo son las corporaciones autónomas regionales o inclusive el IDEAM.

La evapotranspiración potencial de Thornthwaite es un método sencillo de calcular mediante sensores remotos, lo que agiliza el proceso de obtención de la información de entrada. Las correlaciones que se presentaron fueron relativamente altas, con algunas variaciones en ETP día que tiende a crecer bastante a diferencia de ETP promedio que se mantiene estable. En los gráficos presentados en los resultados se pudo notar que la ETP propuesta por Thornthwaite mantiene un comportamiento similar a la temperatura. Es posible la utilización de otros métodos para el cálculo de la ETP, siempre y cuando sean posibles mediante sensores remotos. Aunque como lo visto en la discusión, en la metodología propuesta por Yan, H. et al (2014), el método de Thornthwaite es más sensible al fenómeno de la sequía, y esto se pudo comprobar en los resultados obtenidos por el IDSP en la que se presencia una sequía moderada para el año 2012 en el Valle del Cauca.

Para un análisis más detallado concerniente al balance hídrico, se pueden utilizar las variables de humedad, pérdida, recarga, escurrimiento que, al igual que la ETP, son imágenes resultantes con lo cual es posible analizar su comportamiento en esa zona mes a mes.

10. RECOMENDACIONES

En primera instancia, el AWC utilizado en este estudio fue enfocado solamente a cultivos de caña, puesto que son los cultivos con mayor presencia en el valle geográfico del Rio Cauca; aunque se tomó la profundidad de las raíces de manera general, esto se puede hacer con más detalle teniendo un estudio de las distintas variedades de caña presentes en la zona de estudio, y la profundidad radicular de cada una en diferentes texturas. Por otra parte, si se desea aplicar a distintos tipos de plantas para hacer un estudio aún más detallado de la zona, evidentemente se requeriría un estudio más a fondo de la profundidad de las raíces en distintas texturas para todos los tipos de plantas.

Para el caso de las imágenes de temperatura, es necesario tener en cuenta las siguientes recomendaciones para evitar posibles errores en próximos estudios. Una vez se obtengan las imágenes, es necesario hacer una revisión en busca de valores atípicos. Esto se puede llevar a cabo observando los valores máximos y mínimos de temperatura, si se encuentran muy alejados del valor promedio, es debido a que en esa imagen se pueda encontrar valores atípicos, los cuales se procederán a eliminar. Hecho esto se debe aplicar una interpolación para cada imagen, con el fin de rellenar esos vacíos generados tanto por el algoritmo de eliminación de nubes, como por la eliminación de valores atípicos. Con esto, ya se procede normalmente con la metodología que es el cálculo de las imágenes promedio y demás modelos empleados. Además, si se desea mejorar la correlación en temperaturas, es necesario obtener la temperatura de las estaciones meteorológicas a la misma hora en el que el sensor pasa por esa zona, de esta manera es posible que la correlación sea más alta que las obtenidas normalmente. Aunque solo las imágenes de temperatura día tuvieron una buena correlación, es recomendable utilizar las imágenes promediadas debido al comportamiento de la ETP día, pues tiende a crecer bastante en relación a la ETP en estaciones meteorológicas.

Ahora bien, es posible mejorar la resolución espacial de las imágenes de precipitación, con el fin de tener las imágenes con más detalle y de esa manera los resultados serán mejores en calidad. Según la metodología presentada por Hunink J.E et al (2013) es posible tener una resolución espacial de las imágenes de precipitación hasta 1x1 km, combinando dos productos de la TRMM (imágenes mensuales y diarias), los datos de estaciones meteorológicas, un modelo digital de elevación y un índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI. Según los autores, el método utilizado es muy útil, los resultados son satisfactorios y aplicables en otros lugares.

Si se desea aplicar el índice de severidad de sequía de Palmer a una serie de tiempo en años, se recomienda contar con buenos equipos computacionales que puedan almacenar gran cantidad de información, puesto que las imágenes raster resultantes pueden llegar a ser muy pesados y al momento de procesar los modelos, puede que el equipo no responda correctamente.

11. BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Aiguo D., 2011. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900–2008. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 116, D12115, doi:10.1029/2010JD015541.
- ✓ Alley, W.M., 1984. The Palmer Drought Severity Index: limitations and assumptions – Journal of Climate and Applied Meteorology, 23:1100-1109.
- ✓ Almorox J., 2010. *Métodos de estimación de las evapotranspiraciones ETP y ETR*. Open CourseWare. Universidad Politécnica de Madrid.
- ✓ Alonso J., García A., Estrada A., 2012. Validación del potencial de la información de TST obtenida con MODIS para su aplicación en el desarrollo de modelos de distribución de parásitos. Departamento de Geografía y Departamento de Parasitología, Universidad de Zaragoza.
- ✓ BBC NEWS, 2009. *Cómo combatir la escasez de agua*. BBC Mundo, BBC Ciencia. Marzo 16 de 2009. Disponible en: http://news.bbc.co.uk/hi/spanish/science/newsid_7946000/7946020.stm
- ✓ Boletta P., 2001. *Utilización de información agro meteorológica y satelital para la evaluación de la desertificación en el Chaco Seco, Departamento Moreno, Santiago del Estero*. Tesis de Magíster en Ciencias Agropecuarias, Escuela para Graduados, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- ✓ Brizuela A.B., Noretto M.D., Aguirre C.A., Bressán M.P., 2014. Comparación de datos de precipitación estimada por TRMM con mediciones en estaciones meteorológicas de Entre Ríos, Argentina. Universidad Nacional e Entre Ríos, Universidad Nacional de San Luis & CONICET, Centro de Investigaciones Científicas y Transferencia de Tecnología a la Producción.
- ✓ Campos A., Niels H.N, Díaz C., Rubiano D., Costa C., Ramírez F., Dickson E., 2012. Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas – Bogotá, Colombia: Banco Mundial. <http://gestiondelriesgo.gov.co/sigpad/archivos/GESTIONDELRIESGOWEB.pdf>. Fecha de ingreso: 3 de Mayo de 2013.
- ✓ Castejón O., 2011. Diseño y análisis de experimentos con Statistix, Capítulo 8. Universidad Rafael Urdaneta. Fondo Editorial Biblioteca Universidad Rafael Urdaneta. Vereda del Lago, Maracaibo, Venezuela. ISBN: 978-980-7131-14-8.
- ✓ Castillo D., 1988. *Definición, clasificación y análisis de las sequías*. Tesis de Licenciatura. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. México. Pp. 31-59.

- ✓ Castro E.S., 2014. Evaluación de Imágenes Satelitales de Precipitaciones (TRMM 3B43 mensual) en Región Costa, Sierra y Oriente del Ecuador. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Cuenca. CUENCA – ECUADOR.
- ✓ Castro I.R., 2009. Metodología de validación de productos MODIS para la estimación de temperatura de la superficie en zonas heterogéneas y homogéneas de Colombia. Maestría en Geomática, Escuela de Posgrados, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia.
- ✓ Cenicaña, 2015. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar en Colombia. Fechas históricas de la agroindustria de la caña en Colombia. Página oficial. http://www.cenicana.org/quienes_somos/agroindustria/historia.php
- ✓ Chen, M., Xie P., Janowiak J. E., Arkin P. A., 2002. Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations. J. Hydrometeor., 3, 249–266.
- ✓ Choi M., Jacobs J.M., Anderson M.C., Bosch D.D., 2012. Evaluation of drought indices via remotely sensed data with hydrological variables. Journal of Hydrology 476 (2013) 265–273.
- ✓ Contraloría, 2010. *Estudio nacional sobre cambio climático municipio de Santiago de Cali*. Contraloría General de Santiago de Cali - Dirección técnica de recursos naturales y aseo. Página 11.
- ✓ Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD), Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2012. Reunión de alto nivel de políticas nacionales sobre la sequía. Centro Internacional de Conferencias de Ginebra, 11 a 15 marzo de 2013. Documento de política: Política nacional de gestión de sequías. http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/HLM%20drought%20national%20policies/HMNDP-Policy-document_12225_es.pdf. Fecha de ingreso: 24 de Mayo de 2013.
- ✓ Crespo G., 2005. *Comparación de dos metodologías para el cálculo del índice de severidad de sequía para doce reservas de la biosfera mexicana*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. www.unesco.org/uy/ci/fileadmin/.../mab/crespo-becamab.pdf. Fecha de ingreso: 21 de Febrero de 2015.
- ✓ Diario ADN, 2013. Piden implementar planes de contingencia por temporada de sequía. Publicado el 11 de Febrero de 2013. <http://diarioadn.co/cali/mi-ciudad/planes-de-contingencia-por-temporada-de-sequ%C3%ADa-1.45989>
- ✓ El País, 2012. Ministro de Agricultura asegura que "lo peor de la sequía está por venir". Miércoles, Septiembre 26, 2012 | Autor: Redacción de El País. <http://www.elpais.com.co/elpais/cali/noticias/ministro-agricultura-dice-peor-sequia-esta-por-venir>

- ✓ FAO, 2013. *Esfuerzo concertado de las Naciones Unidas para la adopción de políticas eficaces sobre la sequía*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/171516/icode/>
- ✓ Hunink J.E., Immerzeel W.W., Droogers P., 2013. Análisis de Patrones Espaciales de Precipitación en la Provincia de Tungurahua. Gobierno Provincial de Tungurahua, Ecuador. Programa de Manejo Ecológico de Cuencas de Aguas y Tungurahua.
- ✓ Hurtado G., Cadena M., 2002. *Aplicación de índices de sequía en Colombia*. Meteorol. Colomb. 5:131-137. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.
- ✓ IICA, 1997. *IV Reunión Nacional sobre sistemas de Captación de Lluvia*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, FAZ. ISBN: 968-6201-38-6. IICA Biblioteca Venezuela. Página 65.
- ✓ Li D., Liu Y., Chen Y., 2011. *Regional Drought Monitoring and Analyzing Using MODIS Data — A Case Study in Yunnan Province*. Part II, International Federation for Information Processing (IFIP). AICT 345, pp. 243–251.
- ✓ Luro P., 1982. Vademecum de Cultivos, Riego, Labranzas, Análisis de Costos Programación Lineal Y Evaluación de Proyectos de Inversión para La Zona de Corfo - Río Colorado. Convenio IICA – CORFO – Río Colorado.
- ✓ Maeda E. E., Wiberg D. A., Pellikka K. E., 2011. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *Applied Geography*. Elsevier Journal.
- ✓ Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España (MAGRAMA), 2013. INDICADORES METEOROLÓGICOS. <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia>. Fecha de ingreso: 3 de Mayo de 2014.
- ✓ Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004. Plan de Acción Nacional de Lucha Contra la Desertificación y la Sequía en Colombia. Bogotá D.C. Colombia. http://www.pnud.org.co/img_upload/9056f18133669868e1cc381983d50faa/PAN.pdf. Fecha de ingreso: 3 de Mayo de 2013.
- ✓ Ministerio de Medio Ambiente, 2005. Guía para la redacción de planes especiales de actuación en situación de alerta y eventual sequía. Secretaría General Para El Territorio Y La Biodiversidad - Dirección General Del Agua - Subdirección General De Planificación Y Uso Sostenible Del Agua. http://www.pronacose.gob.mx/pronacose14/Contenido/Documentos/GUIA_PARA_LA_REDACCION.pdf. Fecha de ingreso: 24 de Mayo de 2013.
- ✓ MODIS, 2015. MODIS Overview. MODIS Sinusoidal Tiling System. Sitio oficial: https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/modis_overview. Fecha de ingreso: 3 de Mayo de 2013.

- ✓ Moreno P., 2015. Fondo agua por la vida y la sostenibilidad - Valle geográfico del río Cauca. Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia. <http://www.asocana.org/documentos/2452011-f02f6949-00ff00,000a000,c3c3c3,0f0f0f,b4b4b4,ff00ff,2d2d2d,b9b9b9.pdf>. Fecha de ingreso: 24 de Mayo de 2013.

- ✓ Noticias Caracol, 2013. En alerta, 27 departamentos de Colombia por sequía. <http://www.noticiascaracol.com/nacion/video-283530-alerta-27-departamentos-de-colombia-sequia>. Fecha de ingreso: 8 de Enero de 2013.

- ✓ OMM, 1992. Organización Meteorológica Mundial. *Vocabulario Meteorológico Internacional*. Publicación No. 182. Ginebra, Suiza. http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm_wmo_en.html. Fecha de ingreso: 3 de Mayo de 2013.

- ✓ OMM, 2006. Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros. Organización Meteorológica Mundial ISBN 92-63-31006-8. OMM-N° 1006. http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_drought_monitoring_early_warning_es_2006.pdf. Fecha de ingreso: 3 de Mayo de 2013.

- ✓ OMM, 2012. Índice normalizado de precipitación - Guía del usuario. Organización Meteorológica Mundial. ISBN 978-92-63-31090-3. OMM-No 1090. http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf. Fecha de ingreso: 3 de Mayo de 2013.

- ✓ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS - ONU, 2004. Convención de las Naciones Unidas Contra la Desertificación en Países Afectados por Sequía Grave y Desertificación. ONU. Disponible en: <http://www.unccd.int/>.

- ✓ Palmer, W.C., 1965. *Meteorological Drought*. Weather Bureau Research Paper No. 45. Washington, DC: US Department of Commerce.

- ✓ Qiaozhen M., Maosheng Z., Kimball J.S., McDowell N.G., Running S.W., 2013. A Remotely Sensed Global Terrestrial Drought Severity Index. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 83–98. Doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00213.1>. Fecha de ingreso: 3 de Mayo de 2013.

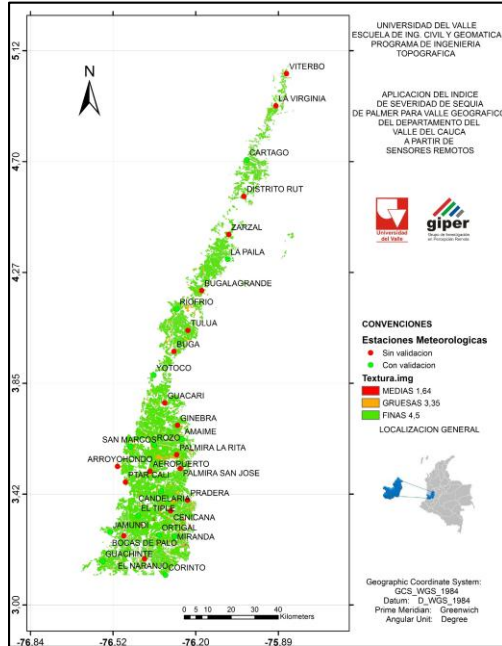
- ✓ Recondo C., Zapico E., Peón J.J., Pendás E., Aguirre R., Abajo A., 2011. Estimación de la temperatura del aire a partir de la temperatura de superficie obtenida con el sensor MODIS e información espacio-temporal. Aplicación en modelos de riesgo de incendios forestales en la Península Ibérica. Conference: XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección (AET), At Mieres (Asturias, España), Volume: "Teledetección. Bosques y cambio climático" Ed. by C. Recondo & E. Pendás. Mieres (Asturias). pp. 457-460.

- ✓ Revista Hechos y Crónicas, 2013. Fuerte sequía azota a Colombia. Publicado el 2 de Mayo del 2013. <http://www.hechosycronicasrevista.com/index.php/analisis/eden/item/348-fuerte-sequia-azota-a-colombia>.
- ✓ Sergio M., Serrano V., Beguería S., Lorenzo J., Camarero J.J., López J.I., Azorín C., Revuelto J., Morán E., Sánchez A., 2010. Análisis comparativo de diferentes índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas. Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas; Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas; ARAID-Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas; Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich.
- ✓ Sergio M., Serrano V., 2011. Las sequías climáticas: de la cuantificación global a los impactos locales. Instituto Pirenaico de Ecología Consejo Superior de Investigaciones Científicas. <http://www.ugr.es/~geomet/doc/sequias.pdf>. Fecha de ingreso: 24 de Mayo de 2013.
- ✓ Thornthwaite W., 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, Vol. 38, No. 1. (Jan., 1948), pp. 55-94.
- ✓ UNAM, 2010. Serie de textos universitario núm. 1. Capítulo V. Ecurrimiento .*Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico* disponible en:http://www.igeograf.unam.mx/web/sigg/docs/pdfs/publicaciones/geo_sigloxxi/serie_t_ex_uni/1/cp5.pdf. Fecha de ingreso: 3 de Mayo de 2013.
- ✓ UNCCD, 2007. Tercer Informe Nacional de Implementación de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía. Bogotá, D.C. Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial / Secretaría UNCCD. https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadYServiciosEcosistemicos/pdf/Zonas-Secas/5638_010610_tercer_informe_desertificacion.pdf. Fecha de ingreso: 3 de Mayo de 2013.
- ✓ United Nations, 2002. Crónica ONU, No. 4. United Nations Publications. ISBN 9706612106, 9789706612106. https://books.google.com.co/books?id=cLGHOTAAa4C&hl=es&source=gbs_navlinks_s. Fecha de ingreso: 3 de Mayo de 2013.
- ✓ Valiente, O.M., 2001. Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Barcelona. *Investigaciones Geográficas*, n° 26 pp. 59-80.
- ✓ Vega L., 2005. *Evapotranspiración*. Disponible en <http://www.geologia.uson.mx/academicos/lvega/ARCHIVOS/ARCHIVOS/EVAP.htm>. Fecha de ingreso: 3 de Mayo de 2013.
- ✓ Vélez M., 2010. Universidad Nacional –Medellín *Métodos para determinar la recarga en acuíferos* Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4442/1/EA3760.pdf>. Fecha de ingreso: 5 de Mayo de 2013.

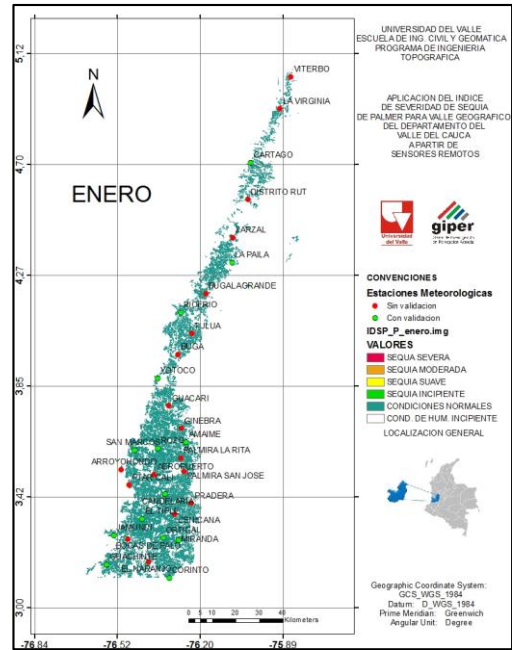
- ✓ Vicente J., 2014. Análisis de la evolución de sequías con metodologías de teledetección. Maestría en Ingeniería De Los Recursos Hidricos. Universidad Nacional Del Litoral, Facultad De Ingeniería Y Ciencias Hidricas. <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8180/tesis/bitstream/1/593/1/Tesis%20MIRH%20Szymula%20Completa.pdf>. Fecha de ingreso: 3 de Mayo de 2013.
- ✓ Yan, H., S.-Q. Wang, H.-Q. Lu, Q. Yu, Z.-C. Zhu, R. B. Myneni, Q. Liu, and H. H. Shugart, 2014. Development of a remotely sensing seasonal vegetation-based Palmer Drought Severity Index and its application of global drought monitoring over 1982–2011, J. Geophys. Res. Atmos., 119, doi:10.1002/2014JD021673.
- ✓ Zuluaga J., 2009. *Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la sequía en Colombia*. Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia. - See more at: <http://www.bdigital.unal.edu.co/2275/#sthash.tUhlCWC.dpuf>

ANEXOS

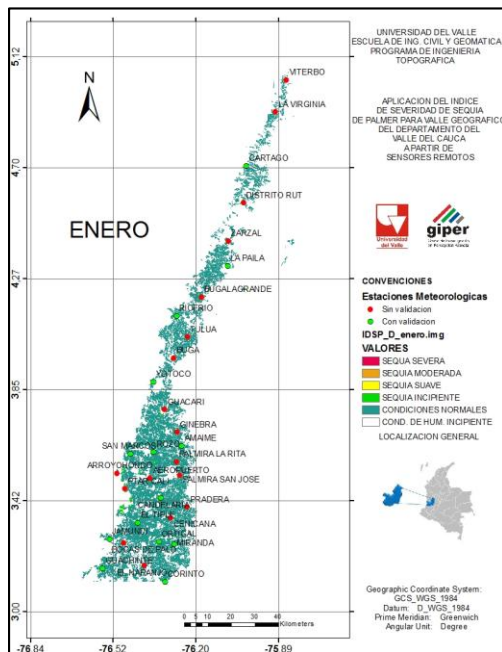
Anexo 1. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo para cultivos de caña.



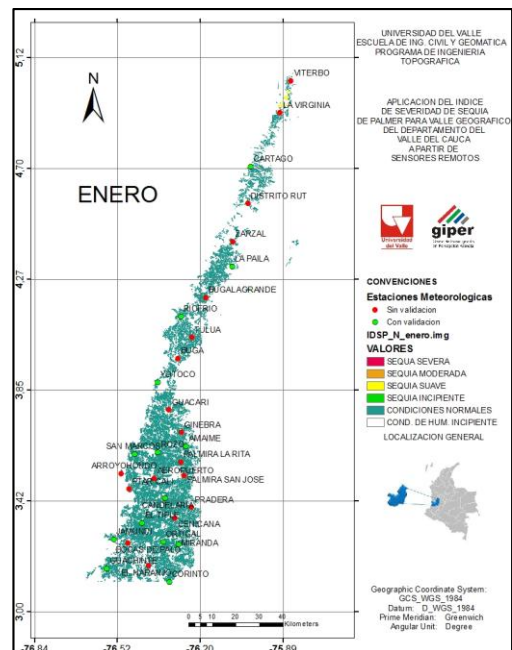
Anexo 3. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de enero temporalidad promedio en el año 2012.



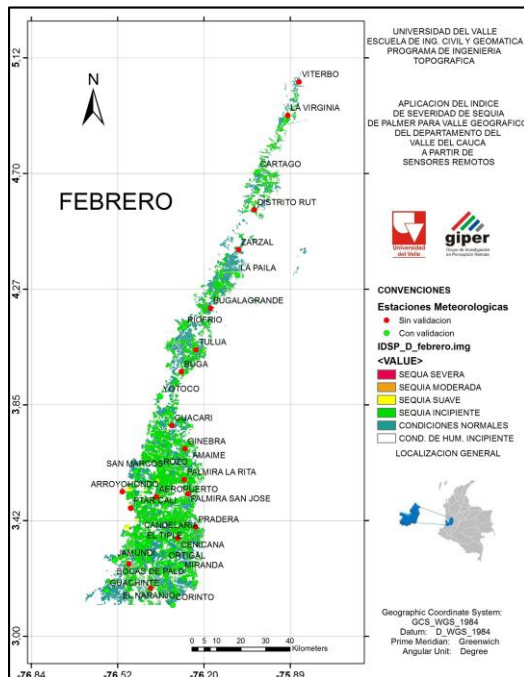
Anexo 2. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de enero temporalidad día en el año 2012.



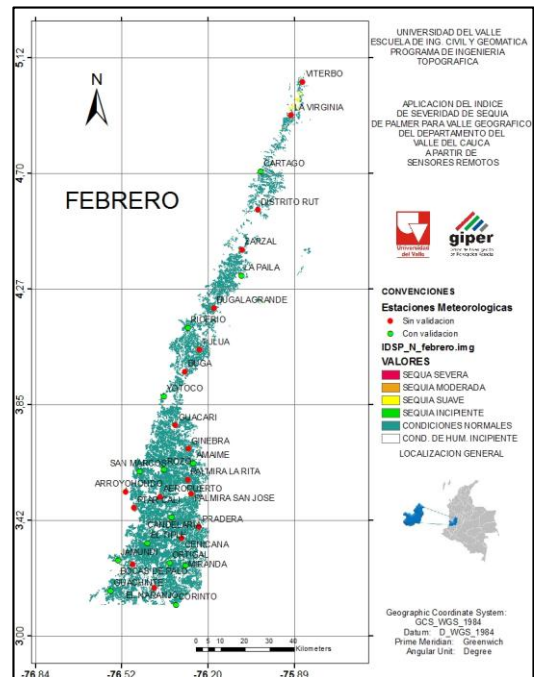
Anexo 4. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de enero temporalidad noche en el año 2012.



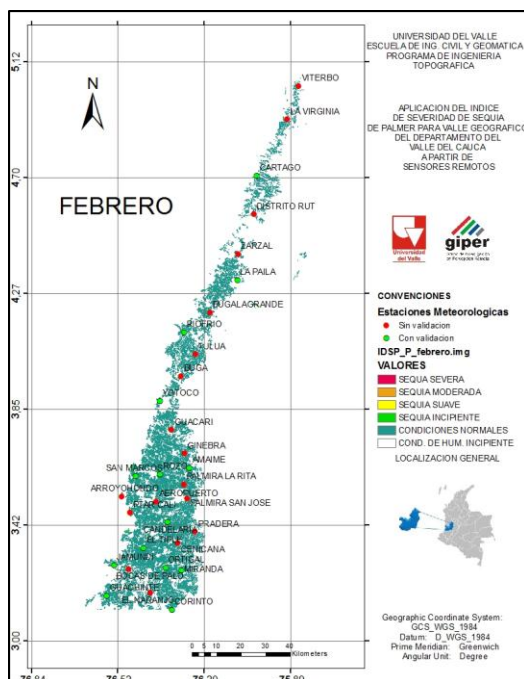
Anexo 5. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Febrero temporalidad día en el año 2012.



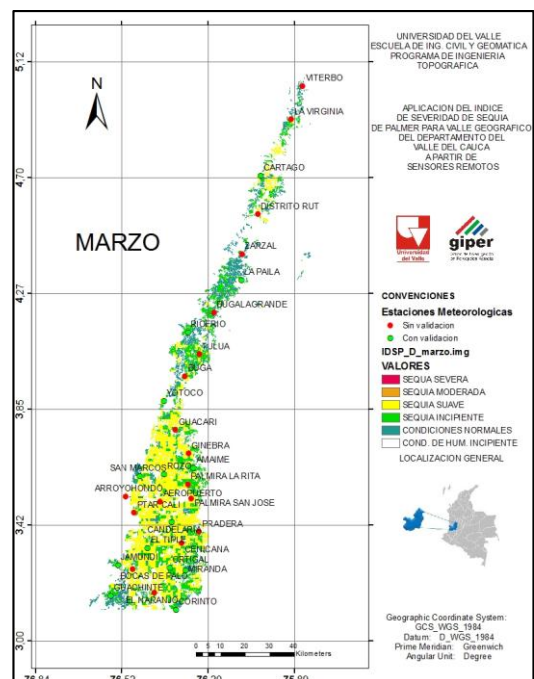
Anexo 7. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Febrero temporalidad noche en el año 2012.



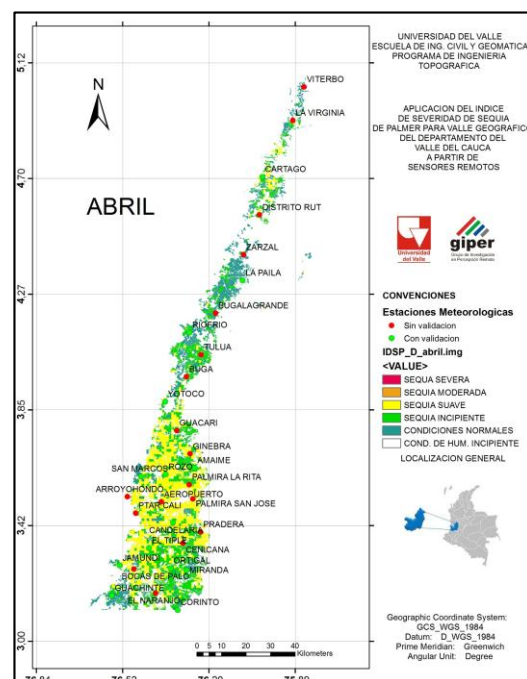
Anexo 6. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Febrero temporalidad promedio en el año 2012.



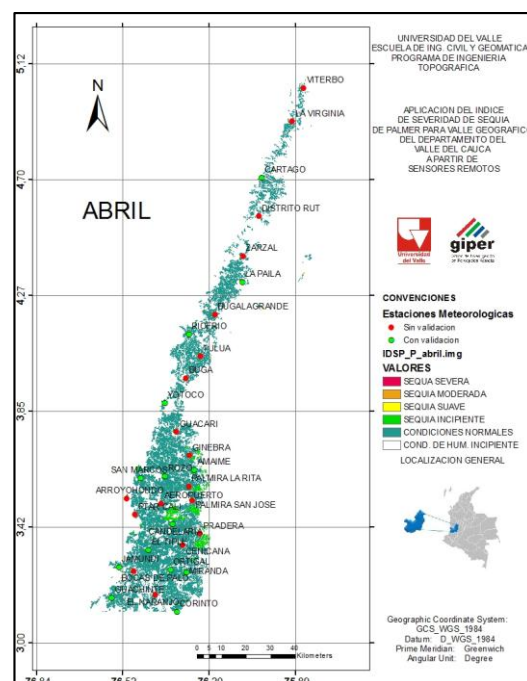
Anexo 8. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Marzo temporalidad día en el año 2012.



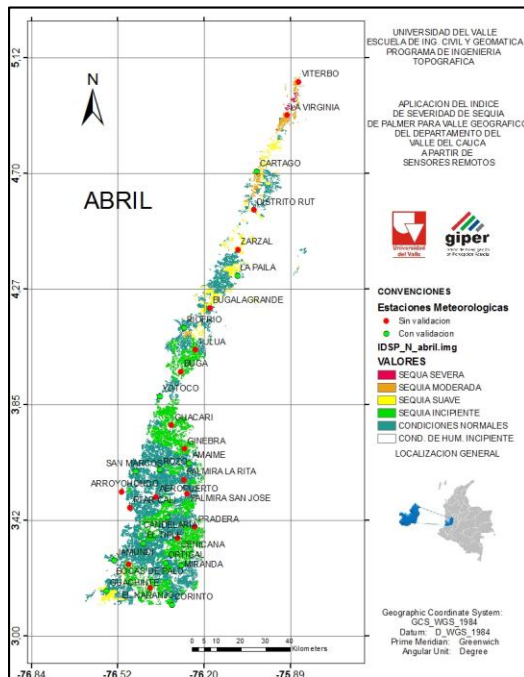
Anexo 11. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Abril temporalidad día en el año 2012.



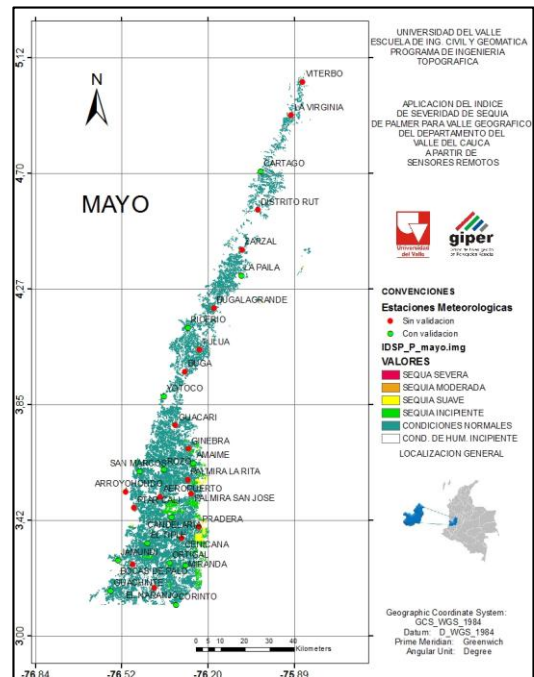
Anexo 12. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Abril temporalidad promedio en el año 2012.



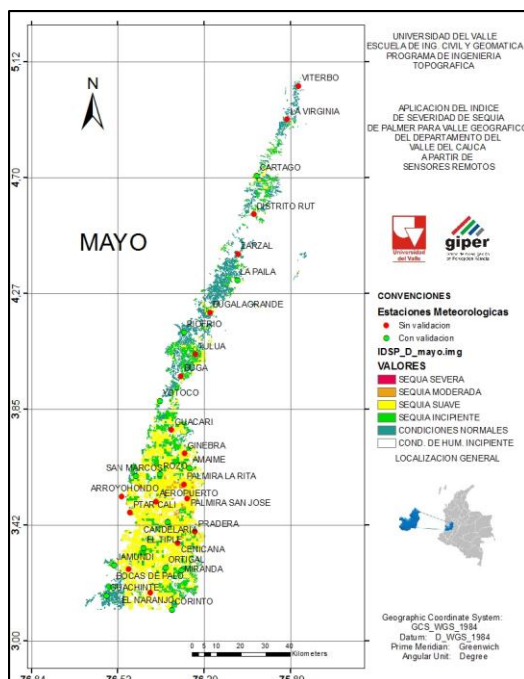
Anexo 13. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Abril temporalidad noche en el año 2012.



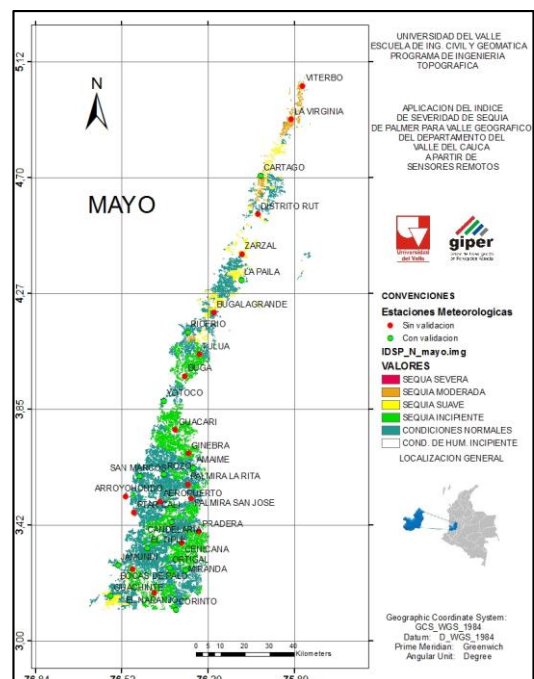
Anexo 15. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Mayo temporalidad promedio en el año 2012.



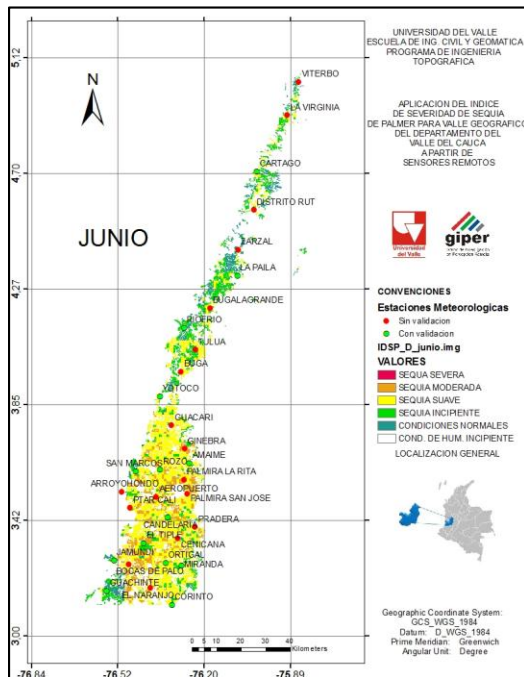
Anexo 14. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Mayo temporalidad día en el año 2012.



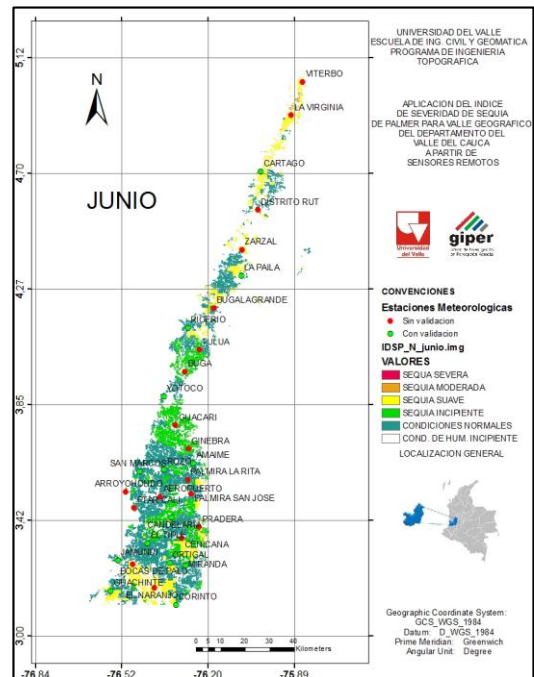
Anexo 16. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Mayo temporalidad noche en el año 2012.



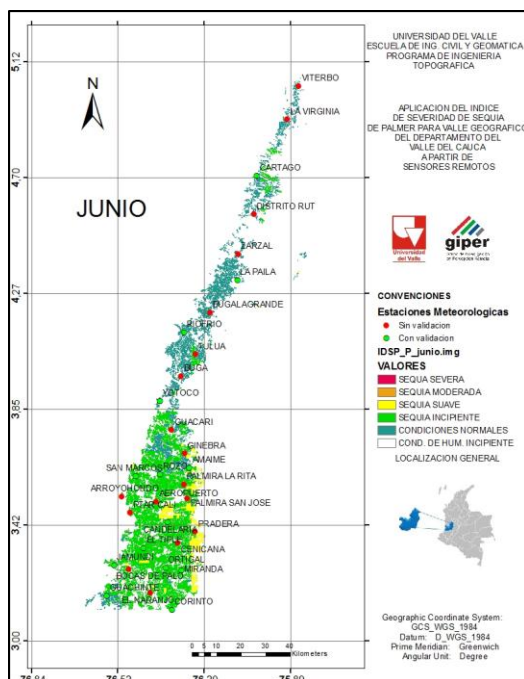
Anexo 17. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Junio temporalidad día en el año 2012.



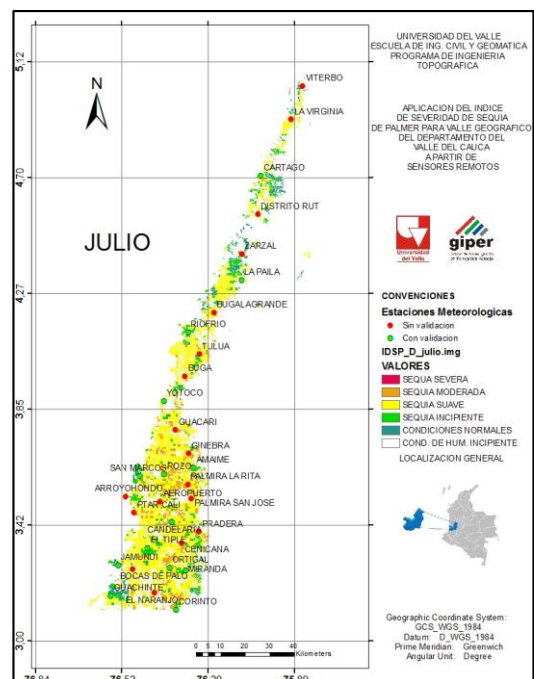
Anexo 19. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Junio temporalidad noche en el año 2012.



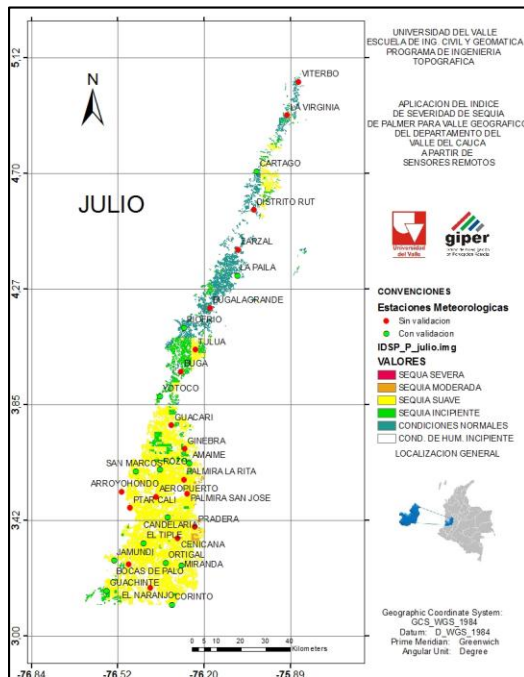
Anexo 18. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Junio temporalidad promedio en el año 2012.



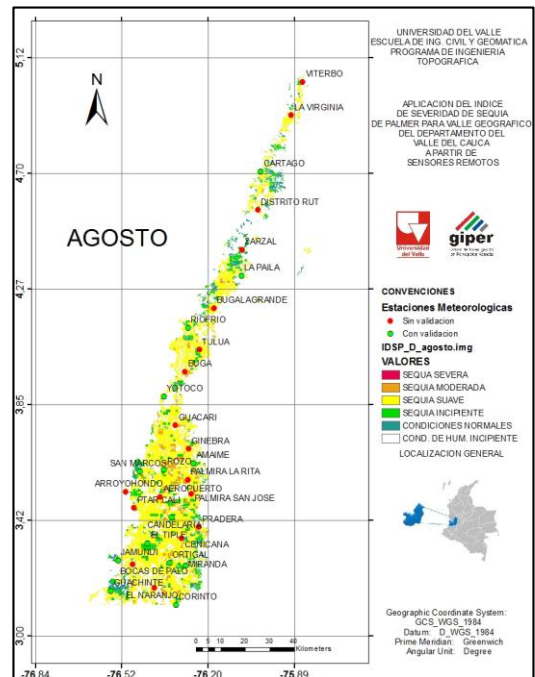
Anexo 20. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Julio temporalidad día en el año 2012.



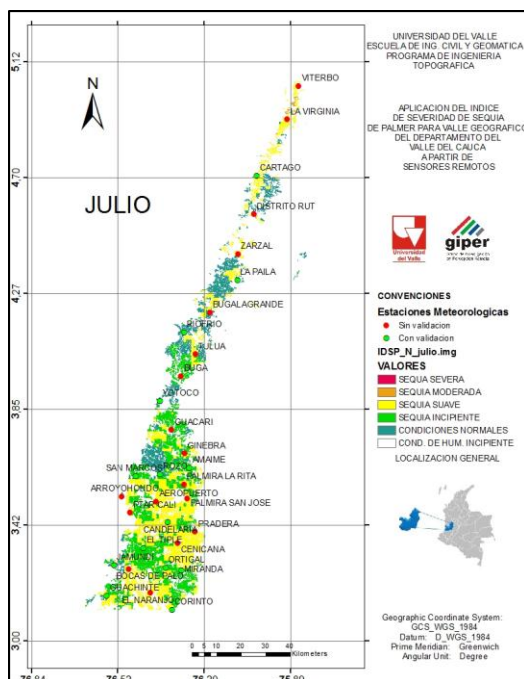
Anexo 21. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Julio temporalidad promedio en el año 2012.



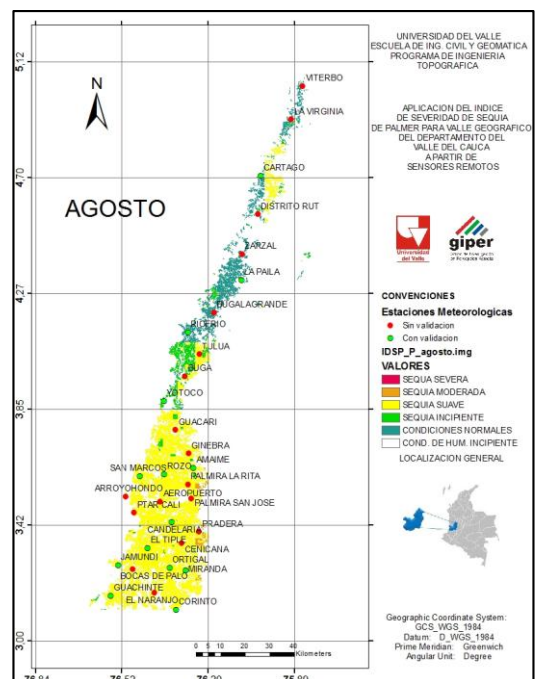
Anexo 23. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Agosto temporalidad día en el año 2012.



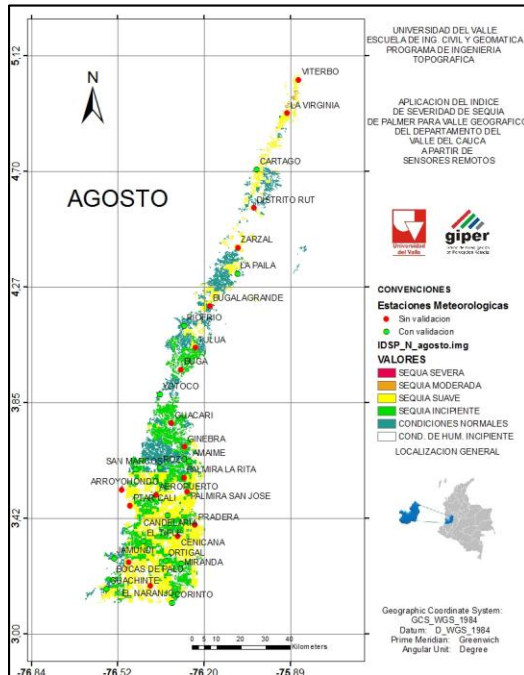
Anexo 22. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Julio temporalidad noche en el año 2012.



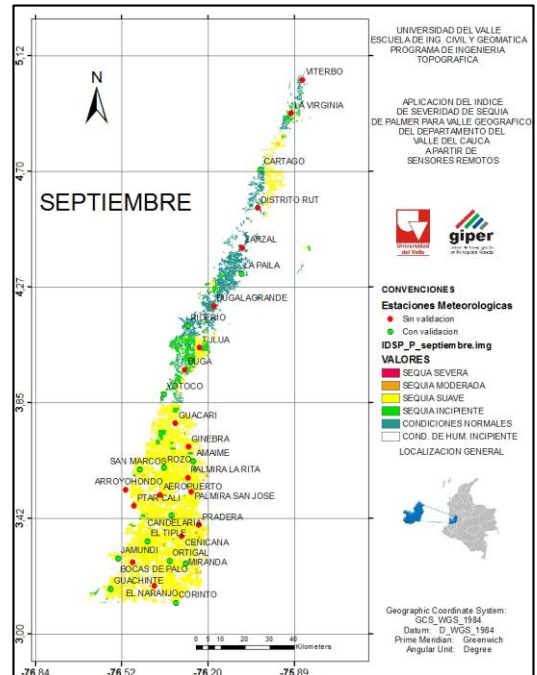
Anexo 24. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Agosto temporalidad promedio en el año 2012.



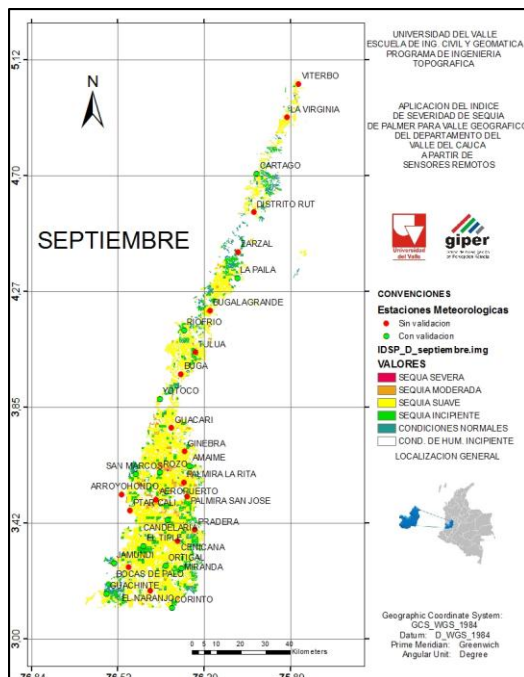
Anexo 25. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Agosto temporalidad noche en el año 2012.



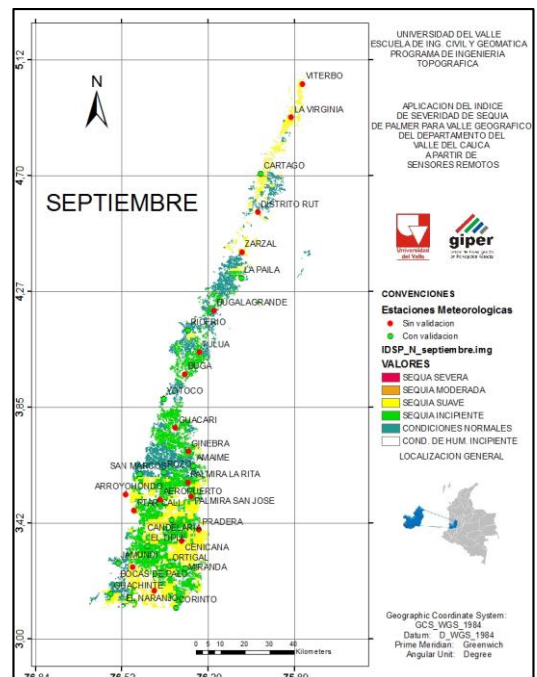
Anexo 27. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Septiembre temporalidad promedio en el año 2012.



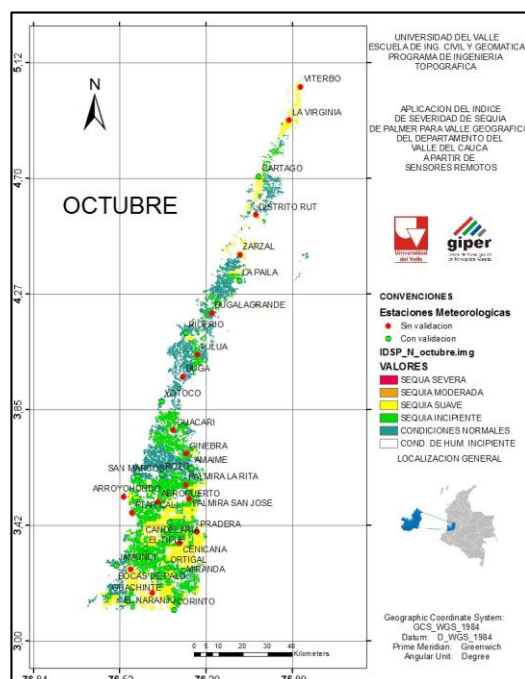
Anexo 26. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Septiembre temporalidad día en el año 2012.



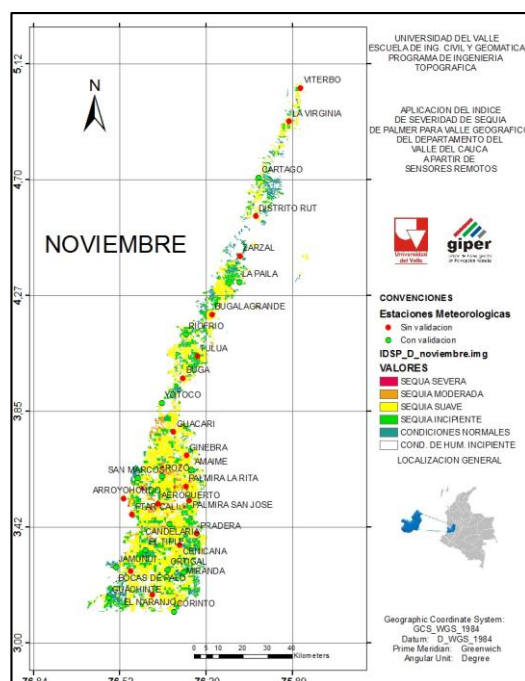
Anexo 28. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Septiembre temporalidad noche en el año 2012.



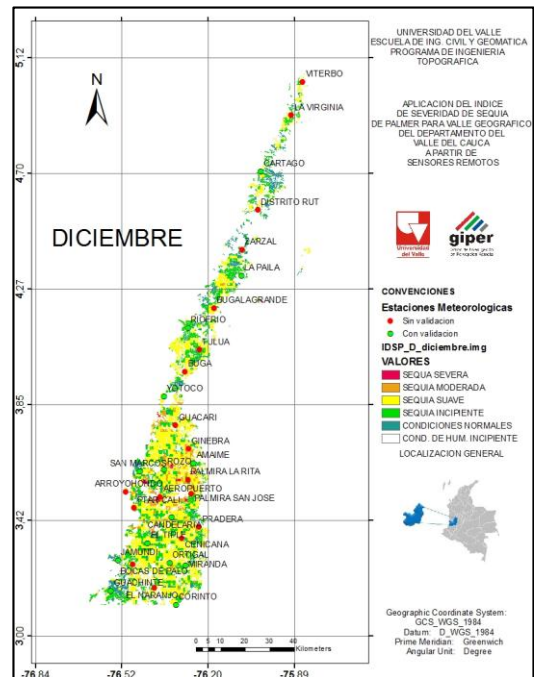
Anexo 31. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Octubre temporalidad noche en el año 2012.



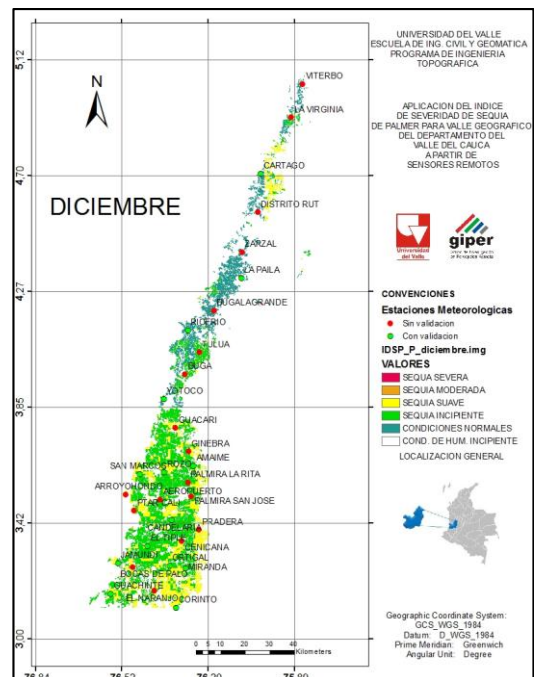
Anexo 32. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Noviembre temporalidad día en el año 2012.



Anexo 35. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Diciembre temporalidad día en el año 2012.



Anexo 36. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Diciembre temporalidad promedio en el año 2012.



Anexo 37. Mapa del índice de severidad de sequía de Palmer perteneciente al mes de Diciembre temporalidad noche en el año 2012.

