



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**“ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE
LA PRODUCCIÓN HÍDRICA DE LA CUENCA DEL RIO
UNARE MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES SATELITALES”**

Trabajo Especial de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil

ELABORADO POR:

López Ramírez, Samuel Alejandro

Urbina Graterol, Leanny Nathaly

TUTOR: Ing. Adriana Márquez

Valencia, Mayo 2016



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**“ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE
LA PRODUCCIÓN HÍDRICA DE LA CUENCA DEL RIO
UNARE MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES SATELITALES”**

ELABORADO POR:

López Ramírez, Samuel Alejandro

Urbina Graterol, Leanny Nathaly

TUTOR: Ing. Adriana Márquez

Valencia, Mayo 2016



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
DEPARTAMENTO: INGENIERIA AMBIENTAL



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado, presidido por la profesora **MÁRQUEZ ADRIANA** y los profesores **FARIAS BETTYS** y **SALAZAR ÍTALO** han sido designadas para estudiar el Trabajo Especial de Grado titulado: "ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA PRODUCCIÓN HÍDRICA DE LA CUENCA DEL RÍO UNARE MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES SATELITALES" realizado por los bachilleres: **LEANNY N. URBINA G. C.I. V-19.755.901**, **SAMUEL A. LÓPEZ R. C.I. V-20.895.836**, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.


Miembro del Jurado
20.895.836


Presidente del Jurado
Adriana Márquez


Miembro del Jurado
11.354.542





UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL



“ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA PRODUCCIÓN HÍDRICA DE LA CUENCA DEL RÍO UNARE MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES SATELITALES”

Autores:

López R. Samuel A.

Urbina, Leanny N.

TUTOR: Ing. Adriana Márquez

Fecha: Mayo 2016

RESUMEN

La investigación al estudio de la cuenca del Río Unare, ubicado entre los estados Guárico y Anzoátegui en la República Bolivariana de Venezuela, la cual tiene como propósito analizar la variación espacio-temporal de variables físicas, mediante la aplicación del modelo SEBAL, estimando así la producción hídrica de la cuenca del Río Unare. El tipo de estudio es descriptivo con base en un diseño no experimental. Esta investigación tiene como técnicas de recolección de datos la observación científica indirecta, cuyos instrumentos o medios para obtener la información son imágenes digitales para los años 2016, 2015, 2014, 2013, 2003, 2001 provenientes de los satélites Landsat 7 y 8; además información meteorológica suministrada por el Servicio de Meteorología de la Aviación Militar y obtención de información del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, con los datos correspondientes a la fecha que fue tomada cada imagen satelital. Esta información fue procesada con las aplicaciones del software Arcgis 10.0 para realizar la modelación del proceso de evapotranspiración.

Palabras clave: Cuenca, satélites Landsat, modelo SEBAL, evapotranspiración, producción hídrica.

DEDICATORIA

A Dios, por haberme permitido culminar esta etapa, por darme salud e iluminar mi mente en todo momento, aún en los tiempos más difíciles.

A las Ánimas de Guasare y Profesor Lino Valles, por siempre corresponder a mis peticiones de mantenerme enfocada aún en los momentos de mayor estrés y caos durante toda la carrera y porque mis abuelas no se equivocaron al enseñarme a creer en ustedes

A mis padres, Andryk Urbina y Marta Graterol de Urbina, por ser los mejores padres, amigos, por inculcarme los valores que puse en práctica durante toda la carrera y por ayudarme a cumplir estas y todas las metas que me he propuesto.

A mi tía Carmen Graterol, por, en resumen, ser mi segunda madre. Me has hecho todo más llevadero, gracias a tu apoyo y cariño infinito.

A mi familia, porque no se han cansado de brindarme cariño, apoyo y porque siempre han creído, confiado en mí y porque se han tomado como suyos mis problemas y mis triunfos.

A mis abuelos, Andrés Urbina y Gerardo Graterol y a mi tía Nancy Graterol, porque sé que desde el cielo han seguido cuidando de mí, cuidándome y orientándome.

A todos mis profesores, por tomarse el tiempo de transmitirme, no solo sus conocimientos, sino también su ética profesional y calidad humana, sin excepción.

A mis amigos, de la infancia, de secundaria y a todos aquellos que me demostraron serlo durante la carrera, por compartir los buenos y malos momentos.

A los mejores amigos de mi papá, porque se han convertido en hermanos y segundos padres para mí, pues no dejaron de celebrar conmigo, de apoyarme y acompañarme durante toda esta etapa.

A todas aquellas personas que creyeron en mí, se tomaron el tiempo de aconsejarme y, de una u otra manera, me apoyaron a lo largo de esta difícil etapa.

¡Gracias!

Leanny N., Urbina G.

DEDICATORIA

Ante todo, primeramente le dedico esta investigación a dios ya que sin él nada es posible. Seguidamente de mi familia, mi mamá María Ramírez que con su esfuerzo de madre logra hallar soluciones a todos los problemas, a mi hermano Carlos Soto por ser inspiración en el profesional que quiero ser. A todos mis hermanos que me apoyan en momentos difíciles, a mi tía Carmen Ramírez, la cual se porta como otra madre conmigo, a mi padre Manuel López que es un apoyo intelectual.

Samuel López

AGRADECIMIENTOS

A Dios quien todo lo puede, que sin su presencia y su amor no logramos nuestros objetivos.

A la tutora de esta investigación Adriana Márquez que se convierte en ejemplo e inspiración de trabajo y tenacidad para todas las personas que tienen el placer de ser sus alumno y por brindarnos su ayuda, conocimiento y darnos la posibilidad de trabajar en el CIHAM-UC, Gracias.

A la profesora Bettys Faria por su apoyo en la investigación.

Al Departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Carabobo por el apoyo prestado.

A la Universidad de Carabobo, por permitirnos la oportunidad de adquirir los conocimientos durante todos estos años de los mejores ingenieros y profesionales que tiene el país; en nuestro desarrollo como profesionales.

¡GRACIAS!

INDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRAC	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	V
INDICE DE FIGURAS	IX
INDICE DE TABLAS	XII
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	2
<i>El Problema</i>	2
<i>Planteamiento del Problema</i>	2
<i>Formulación del Problema</i>	4
<i>Objetivos de la Investigación</i>	5
<i>Objetivo General</i>	5
<i>Objetivo Específicos</i>	5
<i>Justificación</i>	6
<i>Delimitaciones</i>	7
CAPITULO II	8
ANTECEDENTES	8
<i>Antecedentes de la Investigación</i>	8
MARCO DE REFERENCIA	10
MARCO TEÓRICO	12
<i>Bases Teóricas</i>	12
<i>Satélite Landsat</i>	12
<i>Sistema de Referencia Mundial</i>	13
<i>Sistema de Información Geográfica (SIG)</i>	14
<i>Cuenca Hidrológica</i>	15
<i>Ciclo Hidrológico</i>	15
<i>Balance Hídrico</i>	15
<i>Precipitación</i>	17
<i>Evaporación</i>	17

<i>Radiación Solar</i>	18
<i>Temperatura del aire</i>	20
<i>Velocidad del viento</i>	22
<i>Humedad relativa</i>	22
<i>Punto de rocío</i>	23
<i>Transpiración</i>	23
<i>Evapotranspiración</i>	24
<i>Evapotranspiración potencial (ET_P)</i>	25
<i>Evapotranspiración real (ET_a)</i>	26
<i>Evapotranspiración de referencia (ET₀)</i>	26
<i>Evapotranspiración del cultivo (ET_C)</i>	27
<i>Radiación Neta</i>	28
<i>Flujo de Calor del Suelo</i>	28
<i>Flujo de Calor Sensible</i>	28
<i>Modelos</i>	29
<i>Modelos determinísticos</i>	29
<i>Calibración de los parámetros del modelo</i>	30
<i>Simulación del modelo</i>	30
<i>Modelo SEBAL</i>	31
<i>Conversión de ND a Radiancia espectral</i>	33
<i>Conversión a Reflectancia en el tope de la atmósfera</i>	34
<i>Albedo en el tope de la atmósfera</i>	34
<i>Albedo superficial</i>	36
<i>Índices de Vegetación</i>	36
<i>Índices de Vegetación de Diferencias Normalizadas</i>	37
<i>Índice de Vegetación Ajustado al Suelo</i>	38
<i>Índice de Área Foliar</i>	39
<i>Emisividad</i>	40
<i>Radiancia térmica corregida</i>	41
<i>Temperatura de la superficie</i>	42
<i>Temperatura de brillo en el satélite</i>	43
<i>Radiación de Onda Larga de Salida</i>	44

<i>Radiación de Onda Larga Incidente</i>	45
<i>Píxeles Ancla</i>	45
<i>Radiación de Onda Corta Entrante ($R_{s\downarrow}$)</i>	46
<i>Radiación Neta (R_n)</i>	46
<i>Flujo de Calor en el Suelo (G)</i>	47
<i>Longitud de Rugosidad Superficial</i>	48
<i>Flujo de Calor Sensible</i>	49
<i>Flujo de Calor Latente (λE), ET Instantánea y Fracción Evaporativa</i>	58
<i>Evapotranspiración Diaria (ET_{24})</i>	60
CAPITULO III	61
MARCO METODOLOGICO	61
<i>Tipo de Investigación</i>	61
<i>Diseño de la Investigación</i>	62
<i>Población y Muestra</i>	62
<i>Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.</i>	63
<i>Descripción de la Metodología</i>	64
<i>Fase de Recolección de Datos</i>	64
<i>Imágenes Satelitales</i>	65
<i>Estaciones Meteorológicas</i>	70
<i>Fase de Procesamiento de Datos</i>	72
<i>Fase de Obtención de Resultados.</i>	85
CAPITULO IV	87
ANALISIS DE RESULTADO	87
CONCLUSIONES	121
RECOMENDACIONES	122
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	123
ANEXOS	126

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i>	Ubicación de la cuenda del Río Unare	11
<i>Figura 2</i>	Sistema de referencia mundial descendente WRS-2	14
<i>Figura 3</i>	Balance de energía superficial	32
<i>Figura 4</i>	Procedimiento para obtención de imágenes satelitales	65
<i>Figura 5</i>	Procedimiento para obtención de imágenes satelitale	66
<i>Figura 6</i>	Procedimiento para obtención de imágenes satelitale	66
<i>Figura 7</i>	Procedimiento para obtención de imágenes satelitale	67
<i>Figura 8</i>	Procedimiento para obtención de imágenes satelitale	67
<i>Figura 9</i>	Procedimiento para obtención de imágenes satelitale	68
<i>Figura 10</i>	Fila y Trayectoria de la Cuenca del Río Unare	69
<i>Figura 11</i>	Ubicación de Estaciones Meteorológicas adscritas al Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana de Venezuela	70
<i>Figura 12</i>	Diagrama correspondiente al proceso de cálculo de algunas variables físicas, mediante la aplicación del modelo SEBAL	73
<i>Figura 13</i>	Diagrama correspondiente al proceso de cálculo de la Radiancia Neta mediante la aplicación del modelo SEBAL	76
<i>Figura 14</i>	Diagrama correspondiente al proceso de cálculo del Flujo de Calor en el Suelo (G) mediante la aplicación del modelo SEBAL.	80
<i>Figura 15</i>	Diagrama de flujo correspondiente al cálculo del Flujo de Calor Sensible (H) para el modelo SEBAL	81
<i>Figura 16</i>	Diagrama correspondiente al cálculo del Evapotranspiración mediante la aplicación del modelo SEBAL	83
<i>Figura 17</i>	Diagrama correspondiente al cálculo de la Producción Hídrica	84
<i>Figura 18</i>	Mapa de Radiación Neta correspondiente al mes de enero de 2016	88
<i>Figura 19</i>	Mapa de Radiación Neta correspondiente al mes de mayo de 2015	89
<i>Figura 20</i>	Mapa de Radiación Neta correspondiente al mes de julio de 2014	89
<i>Figura 21</i>	Mapa de Radiación Neta correspondiente al mes de mayo de 2013	90
<i>Figura 22</i>	Mapa de Radiación Neta correspondiente al mes de febrero de 2003	90
<i>Figura 23</i>	Mapa de Radiación Neta correspondiente al mes de marzo de 2001	91
<i>Figura 24</i>	Mapa de Flujo de Calor del Suelo correspondiente al mes de enero de 2016	92

<i>Figura 25</i>	Mapa de Flujo de Calor del Suelo correspondiente al mes de mayo de 2015	93
<i>Figura 26</i>	Mapa de Flujo de Calor del Suelo correspondiente al mes de julio de 2014	94
<i>Figura 27</i>	Mapa de Flujo de Calor del Suelo correspondiente al mes de mayo de 2013	95
<i>Figura 28</i>	Mapa de Flujo de Calor del Suelo correspondiente al mes de marzo de 2001	96
<i>Figura 29</i>	Mapa de Flujo de Calor Sensible correspondiente al mes de enero de 2016	97
<i>Figura 30</i>	Mapa de Flujo de Calor Sensible correspondiente al mes de mayo de 2015	98
<i>Figura 31</i>	Mapa de Flujo de Calor Sensible correspondiente al mes de julio de 2014	99
<i>Figura 32</i>	Mapa de Flujo de Calor Sensible correspondiente al mes de mayo de 2013	100
<i>Figura 33</i>	Mapa de Flujo de Calor Sensible correspondiente al mes de febrero de 2003	101
<i>Figura 34</i>	Mapa de Flujo de Calor Sensible correspondiente al mes de marzo de 2001	102
<i>Figura 35</i>	Mapa de evapotranspiración mensual correspondiente al mes de enero de 2016	103
<i>Figura 36</i>	Mapa de evapotranspiración mensual correspondiente al mes de mayo de 2015	104
<i>Figura 37</i>	Mapa de evapotranspiración mensual correspondiente al mes de julio de 2014	105
<i>Figura 38</i>	Mapa de evapotranspiración mensual correspondiente al mes de mayo de 2013	105
<i>Figura 39</i>	Mapa de evapotranspiración mensual correspondiente al mes de febrero de 2003	106
<i>Figura 40</i>	Mapa de evapotranspiración mensual correspondiente al mes de marzo de 2001	106
<i>Figura 41</i>	Hietograma de la estación Mapire correspondiente al mes de julio de 2014 (duración: 30 días)	107
<i>Figura 42</i>	Mapa de Precipitación correspondiente al mes de enero de 2016	108
<i>Figura 43</i>	Mapa de Precipitación correspondiente al mes de mayo de 2015	108
<i>Figura 44</i>	Mapa de Precipitación correspondiente al mes de julio de 2014	109
<i>Figura 45</i>	Mapa de Precipitación correspondiente al mes de mayo de 2013	109
<i>Figura 46</i>	Mapa de Precipitación correspondiente al mes de febrero de 2003	110

<i>Figura 47</i>	Mapa de Precipitación correspondiente al mes de marzo de 2001	110
<i>Figura 48</i>	Mapa de Producción Hídrica correspondiente al mes de enero de 2016	111
<i>Figura 49</i>	Mapa de Producción Hídrica correspondiente al mes de mayo de 2015	112
<i>Figura 50</i>	Mapa de Producción Hídrica correspondiente al mes de julio de 2014	112
<i>Figura 51</i>	Mapa de Producción Hídrica correspondiente al mes de mayo de 2013	113
<i>Figura 52</i>	Mapa de Producción Hídrica correspondiente al mes de febrero de 2003	113
<i>Figura 53</i>	Mapa de Producción Hídrica correspondiente al mes de marzo de 2001	114
<i>Figura 54</i>	Producción Hídrica para las diferentes coberturas de suelo correspondiente al mes de enero de 2016	115
<i>Figura 55</i>	Producción Hídrica para las diferentes coberturas de suelo correspondiente al mes de mayo de 2015	115
<i>Figura 56</i>	Producción Hídrica para las diferentes coberturas de suelo correspondiente al mes de Julio de 2014	116
<i>Figura 57</i>	Producción Hídrica para las diferentes coberturas de suelo correspondiente al mes de mayo de 2013	116
<i>Figura 58</i>	Producción Hídrica para las diferentes coberturas de suelo correspondiente al mes de febrero de 2003	117
<i>Figura 59</i>	Producción Hídrica para las diferentes coberturas de suelo correspondiente al mes de Marzo de 2001	117
<i>Figura 60</i>	Producción Hídrica de cobertura de Cuerpos de Agua para todos los años de estudio	118
<i>Figura 61</i>	Producción Hídrica de cobertura Agrícola para todos los años de estudio	119
<i>Figura 62</i>	Producción Hídrica de cobertura Urbana para todos los años de estudio	119
<i>Figura 63</i>	Producción Hídrica de cobertura de Vegetación para todos los años de estudio	120

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>*Descripción de los satélites Landsat</i>	13
Tabla 2	<i>*Radiación recibida y absorbida por la Tierra.</i>	19
Tabla 3	<i>*Energía Solar reflejada</i>	20
Tabla 4	<i>*Valores de constantes de conversión térmica pertenecientes al satélite Landsat8.</i>	43
Tabla 5	<i>*Información de Imágenes Satelitales de la Cuenca del Río Unare, ubicada entre los estados Guárico - Anzoátegui.</i>	69
Tabla 6	<i>*Estaciones meteorológicas del Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana de Venezuela para el uso de la Cuenca del Río Unare, Estados Guárico - Anzoátegui</i>	70
Tabla 7	<i>*Estaciones meteorológicas descargadas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de la Cuenca del Río Unare, Estados Guárico - Anzoátegui</i>	71
Tabla 8.	<i>*(Cont.) Estaciones meteorológicas descargadas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de la Cuenca del Río Unare, Estados Guárico - Anzoátegui</i>	72
Tabla 9	<i>*Valores de ESUN y coeficientes ponderados para cada banda de imágenes satelitales provenientes del satélite Landsat 8.</i>	75
Tabla 10	<i>*Coordenadas y atributos de los píxeles “ancla” para imágenes satelitales que conforman la cuenca del Río Unare, ubicada entre los estados Guárico y Anzoátegui en la República Bolivariana de Venezuela, provenientes del satélite Landsat 7</i>	78
Tabla 11	<i>*Coordenadas y atributos de los píxeles “ancla” para imágenes satelitales que conforman la cuenca del Río Unare, ubicada entre los estados Guárico y Anzoátegui en la República Bolivariana de Venezuela, provenientes del satélite Landsat 8</i>	79
Tabla 12	<i>*Resultados obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales correspondientes a la cuenca del Río Unare, ubicada entre los estados Guárico y Anzoátegui, mediante la aplicación del modelo SEBAL y el software ArcGis- ArcMap 10.0.</i>	86

INTRODUCCIÓN

Debido a la crisis del clima que perturba el desarrollo de la vida de las personas a nivel mundial, las preocupaciones de los estudios hidrológicos y ambientales y en caso particular de la línea de investigación del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIAM - UC), es el manejo de cuencas, es obtener el comportamiento de una cuenca, con el objetivo de conocer las capacidades hídricas de la misma, y darle solución a los problemas ambientales generados por fenómenos naturales, así como a problemas de ingeniería y los problemas socio-económicos, además e igual de importante saber aprovechar los recursos hídricos.

Antes de aprovechar los recursos hídricos de cualquier cuerpo de agua o alguna cuenca se debe llevar a cabo investigaciones que determinen la producción hídrica de la misma, por esta razón parte de esta investigación es presentar la metodología para analizar la producción hídrica de la cuenca del Río Unare, ubicada en los estados Guárico y Anzoátegui, mediante la aplicación del Algoritmo para el Balance de Energía Superficial (SEBAL).

Esta investigación consta de cinco capítulos, en el primero se hace el planteamiento del problema que motivó esta investigación, sus objetivos, justificación y las delimitaciones de la misma. Luego, se presenta el capítulo, dos donde se presentan los antecedentes utilizados y que hicieron algún aporte al desarrollo de este trabajo, así como las bases teóricas que sustentan esta investigación. Seguidamente, el capítulo tres expone la metodología aplicada basada principalmente en el uso del software Arcgis 10.0 y sus distintas extensiones, para la aplicación del modelo SEBAL. En el capítulo cuatro se presenta el análisis de los resultados obtenidos con la metodología aplicada y, finalmente, el quinto y último capítulo contiene las conclusiones obtenidas de la investigación y las recomendaciones.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

Planteamiento del Problema

Actualmente la crisis del clima es una realidad que tiene consecuencias evidentes, a corto y largo plazo, en el desarrollo de la vida de las personas a nivel mundial. Esta crisis está representada por dos grandes tópicos: la variabilidad climática y el cambio climático.

El Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno del Niño (CIIFEN) define la variabilidad climática como una medida del rango en que los elementos climáticos varían de un año a otro. Esta se presenta cuando un fenómeno genera un comportamiento anormal del tiempo, siendo temporal y transitorio. Tal es el caso del fenómeno del Niño-Oscilación del (ENOS), que ocurre cada tres a siete años aproximadamente y comienza cuando las aguas superficiales del Pacífico Ecuatorial se vuelven más calientes (El Niño), o frías (La Niña), que lo normal frente a las costas de Perú y Ecuador. Esto marca patrones extremos de sequías y precipitaciones, que afectan a gran parte del planeta.

Por su parte, la Convención Marco sobre Cambio Climático (CMCC) define el cambio climático como un cambio de clima atribuido a la actividad humana, de forma directa o indirecta, cuya manifestación no es temporal y puede comprobarse en el tiempo a través de la revisión de registros climáticos. Un ejemplo clave lo representa el cambio de la temperatura.

Los “fenómenos” antes descritos inciden de manera importante en el desarrollo de la vida, puesto que las consecuencias incluyen la afectación de las actividades económicas como el turismo y la agricultura, que a su vez pone sobre la mesa la posibilidad de una crisis de alimentos debido a la ocurrencia de eventos extremos cada vez más intensos como tormentas, inundaciones y sequías. Otras de las consecuencias que esto acarrea tienen que ver con la afectación en la

habitabilidad de las zonas costeras, y más acentuadamente con la disponibilidad de los recursos hídricos, siendo necesario la adecuada gestión de estos.

La Republica Bolivariana de Venezuela no escapa de esta realidad puesto que, a pensar de posicionarse entre los países con mayores reservas de agua dulce del planeta, los efectos adversos del cambio climático podrían agravar la situación de presión ejercida sobre sus recursos hídricos, ya que adicionalmente se presentan problemas, no solo relacionados con la oferta, sino con la calidad del agua, por lo que es necesario una adecuada gestión de estos recursos.

Entre los recursos hídricos nacionales, uno de los más importantes está representado por la cuenca del Río Unare, ubicada entre los estados Guárico y Anzoátegui. Esta cuenca posee dos lagunas llamadas Unare y Píritu, las cuales representan una fuente de trabajo relacionada con la pesca, además de 11 embalses que abastecen a las comunidades aledañas

Los embalses de la cuenca Unare ubicados en el estado Guárico son: La Becerra, El Pueblito, El Cigarrón, Tamanaco, Taparito, El Médano y El Guaical, los cuales prestan servicio a las poblaciones de Zaraza, Tucupido, El Socorro, Santa María de Ipire y Valle de la Pascua. Por su parte, el estado Anzoátegui posee las presas La Estancia, El Cují, El Andino y Vista Alegre que abastece a las poblaciones de Aragua de Barcelona, Onoto y El Chaparro (MINEA, 2016).

Es debido a la importancia de la cuenca del Río Unare, que la presente investigación está orientada a la estimación de su producción hídrica, con el uso de imágenes satelitales procesadas mediante la aplicación del modelo SEBAL (Algoritmo para el Balance de Energía Superficial) con el fin de analizar la variación espacial y temporal de dicha producción.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Qué variables físicas se deben diagnosticar para estimar la producción hídrica de la cuenca del Río Unare?

¿Qué modelo se puede aplicar a la cuenca del Río Unare para estimar la producción hídrica mediante el uso de imágenes satelitales?

¿Cómo determinar la producción hídrica de la cuenca del Río Unare?

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Analizar la variación espacio-temporal de la producción hídrica de la cuenca del Río Unare mediante el uso de imágenes satelitales

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Describir las variables físicas de los modelos de estimación de la producción hídrica de la cuenca del Río Unare mediante el análisis de imágenes satelitales.
- Aplicar el modelo SEBAL para la estimación de la producción hídrica de la cuenca del Río Unare mediante el análisis de imágenes satelitales.
- Analizar la variación espacial y temporal de la producción hídrica mediante el análisis de imágenes satelitales en la cuenca del Río Unare.

JUSTIFICACIÓN

Los estudios basados en modelos matemáticos de variación espacio temporal son muy importantes porque se utilizan para estimar el comportamiento de una cuenca, con el objetivo de conocer las capacidades hídricas de la misma, y darle solución a los problemas ambientales generados por fenómenos naturales, así como a problemas de ingeniería y los problemas socio-económicos.

El presente trabajo sirve a la línea de investigación del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIAM - UC) referente al manejo de cuencas, estudiando en particular la cuenca del Río Unare, apoyando al CIAM - UC a lograr sus objetivos y a proponer soluciones en el área de ambiental e hidrológica, con intenciones de potenciar el impacto de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo en el entorno económico y social de la región y del país a su vez motivar a profesionales en el área a que realicen este tipo de investigaciones.

Desde el punto de vista institucional, esta investigación significa un aporte importante para instituciones como el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, para el Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana y para la comunidad en general ya que podrán contar con información suficiente y actualizada sobre los recursos hídricos que poseen.

Adicionalmente, esta investigación contribuirá académicamente al estimular el crecimiento de la capacidad de investigación e innovación de la Universidad de Carabobo con el uso de software y herramientas tecnológicas, ampliar la base de datos para estudiantes y profesores que deseen construir modelos matemáticos.

DELIMITACIONES

El análisis de la producción hídrica de la cuenca del Río Unare se estima mediante el balance de energía entre la precipitación y la evapotranspiración; esta última obtenida por la aplicación del modelo de SEBAL y la precipitación obtenida de los datos de las estaciones meteorológicas de la región.

La aplicación del modelo SEBAL requiere imágenes satelitales, las cuales se obtienen de la página web *EarthExplorer USGS* a partir de los satélites Landsat 7 y Landsat 8. La cuenca del Río Unare se encuentra entre las filas 2 y 3 y las columnas 53 y 54 según el Sistema de Referencia Mundial (WRS: Worldwide Reference System, por sus siglas en inglés) abarcando un total de cuatro imágenes satelitales, de las cuales se consideraron las imágenes de coordenadas (53; 3) y la imagen (53; 4), ya que la imagen (54; 3) y la imagen (54; 4) se encontraban contaminadas por nubes, lo cual hace que la aplicación del modelo SEBAL produzca distorsión en los resultados. Las imágenes a analizar corresponden a los años 2016, 2015, 2014, 2013, 2003 y 2001.

Adicionalmente, el modelo SEBAL requiere información básica meteorológica; dichos datos están suministrados por el Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana correspondientes a las estaciones meteorológicas de la cuenca del Río Unare, ubicada entre los Estados Guárico y Anzoátegui, para las fechas de cada imagen satelital. Además, se dispone en los cálculos de información mensual de la página web del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH) para datos de precipitación.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

Antecedentes de la Investigación

En este capítulo se presenta un resumen de algunos trabajos e investigaciones realizadas en Venezuela y en otros países, utilizando modelos de estimación hidrológicos y estudios sobre cuencas, y en un caso particular la cuenca del Río Unare, que por su contenido o por su metodología se convirtieron en bases de referencia para el desarrollo de esta investigación.

Farías (2015) estudió la validación de modelos de estimación del proceso Lluvia-Escorrentía en la cuenca del Río Unare con el propósito de comprobar la validez de los modelos determinísticos de estimación del proceso lluvia - escorrentía adaptada a la cuenca del Río Unare ubicado en los estados Guárico y Anzoátegui, enfrentando el problema con una investigación del tipo correlacional, dejando así un diseño de investigación no experimental. La población está enmarcada por la cuenca del Río Unare, y la muestra por la utilización de planos topográficos e información hidrometeorológica suministrada por INAMEH con los datos correspondientes a lluvia desde los años 2010 al 2014 y caudales para los años 2010 – 2013. Como resultado, la aplicación de estos modelos matemáticos permitió generar los mapas de inundación; contribuyendo así a la ordenación racional del territorio, a minimizar los daños causados por las inundaciones, a conocer las zonas propensas a inundarse, los canales de flujo preferentes y la delimitación del dominio público para la protección del sistema fluvial frente al comportamiento de los seres humanos.

García y Llellish (2012), desarrollaron una investigación referente a la Estimación Espacial de la Evapotranspiración mediante imágenes de satélite y la aplicación del modelo SEBAL en el humedal Paraíso - Huacho. El objetivo de esta investigación fue evaluar la factibilidad de estimar la evapotranspiración en el

humedal Paraíso aplicando el modelo SEBAL. En esta investigación, la población está representada por el humedal Paraíso, el cual forma parte de los humedales de la costa central de Perú; para la muestra emplearon una sub-escena del satélite Landsat ETM (*Path* 006 y *Row* 068) de fecha 08 de abril de 2000 e información meteorológica, en la cual todas las variables meteorológicas fueron tomadas por estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). En este estudio, representaron los resultados obtenidos en la estimación de la evapotranspiración en el humedal Paraíso de Huacho, mediante la aplicación del modelo de balance de energía superficial conocido como SEBAL a una subescena del satélite Landsat 7 ETM+ con fecha 04 de abril de 2000, la cual coincide con el inicio de la época de afloramiento en el humedal. Como aporte, los resultados obtenidos demuestran que es factible estimar la evapotranspiración real mediante imágenes de satélite con un error medio relativo menor al 10%.

Correa (2010), realizó una investigación sobre la estimación de la producción hídrica mediante la aplicación de modelos hidrológicos en la cuenca del Río Unare. El objetivo de esta investigación es estimar la producción hídrica de la cuenca del Río Unare mediante la aplicación de un modelo hidrológico. Con esta investigación se pudo determinar la oferta hídrica de esta cuenca para satisfacer el abastecimiento de los habitantes del Municipio Bruzual del Estado Guárico.

Rodríguez y González (2001) realizaron un estudio ambiental de la cuenca del Río Unare y las lagunas de Unare y Píritu, con el objetivo de evidenciar los problemas ambientales y proponer lineamientos para su solución, enfocándose en las actividades humanas que afectan directamente el circuito hídrico y a la población de la zona. Como población tomaron a la Región Unare – Píritu y como muestra, mapas cartográficos de la Dirección de Cartografía Nacional del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, imágenes satelitales de LANDSAT en papel fotográfico adquiridas en el Centro de Procesamiento de Imágenes del Instituto de Ingeniería y datos numéricos sobre precipitación y calidad del agua facilitados por la Dirección Hidrológica y Meteorología (DHM). Esta investigación obtuvieron como resultado que los problemas detectados de la región están relacionados por ignorancia de la población

con respecto a la salud y el ambiente, incumplimiento de políticas, planes y leyes por parte de los agentes del manejo ambiental de esa zona; observaron la desvalorización de la salud por parte de la población, lo que lleva a una apreciación distorsionada de los valores ambientales que se ven reflejadas en las alteraciones de sus componentes por influencias directas e indirectas de actividades humanas. Como aporte, esta investigación propone la necesidad de considerar la región como un sistema ambiental y así se tomen en cuenta las actividades directas e indirectas que afectan la calidad, cantidad de movimiento del agua, a demás, resaltan la importancia de los objetivos de la Educación Ambiental.

MARCO REFERENCIAL

En esta fase se identificó el área de estudio de la cuenca del Río Unare. Dicha cuenca está localizada en la porción nororiental y noroccidental de los estados Guárico y Anzoátegui, respectivamente. Está ubicada en la depresión de Unare entre los 8°44'07"- 10°05'31" de latitud norte (ancho= 158,75 km) y los 66°12'37"- 64°09'29" de longitud oeste (largo= 227,50 km) con una superficie aproximada de 22.751km², abarcando 22 municipios de los cuales 14 pertenecen al estado Anzoátegui y 8 al estado Guárico. En la Figura 1 se muestra la ubicación nacional de la cuenca del río Unare.



Figura 1 Ubicación de la cuenda del Río Unare, entre los estados Guárico y Anzoátegui en la República Bolivariana de Venezuela

Los cuerpos de agua se conforman en el sector norte por la cuenca del Río Unare, la cual drena hacia el mar Caribe y de las cuencas de los ríos Manapire, Zuata, Pao y Caris, localizadas en el sector sur, siendo afluentes del Río Orinoco por el margen izquierdo. La cuenca del Unare tiene como uso principal el riego, para lo cual fueron construidos 14 embalses en sus tributarios. El Río Ipire es la fuente de abastecimiento de los municipios Zaraza, Onoto, San José de Unare y Santa María de Ipire y riego agrícola, con el embalse La Becerra.

La región Unare Píritu comprende la cuenca del Río Unare, las lagunas de Unare y Píritu y las cuencas de los ríos tributarios de esas lagunas. El Río Unare desemboca en el Mar Caribe, y también desagua en las lagunas antes mencionadas las cuales intercambian agua con el mar a través de sus bocas.

Según CENAMB (Centro de Estudios Integrales del Ambiente de la Universidad Central de Venezuela), en su cuaderno 5 año 2001, en esta región predomina la clasificación de bosque seco tropical, relieves de colinas bajas y recursos hídricos (embalses y lagunas artificiales) con potencial para realizar actividades turísticas y de acuicultura además áreas donde se realizan actividades de explotación de hidrocarburos, practicas agropecuarias y forestales.

Con respecto a la vegetación, la misma está constituida básicamente de sabanas arbustivas y/o árboles, con relictos de bosques tropófilos bajos deciduos, intercalados con extensos sectores bajo actividad agropecuaria hacia la cuenca baja del río Unare, matorrales tropófilos deciduos y semideciduos.

MARCO TEÓRICO

Bases Teóricas

Satélite Landsat

Es un programa desarrollado por la NASA Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA: *National Aeronautics and Space Administration, por sus siglas en inglés*), originalmente denominado ERTS (Earth Resources Technology Satellite, por sus siglas en inglés). El primero de sus satélites fue puesto en órbita el 23 de julio de 1972 con carácter experimental, cuyo objetivo era demostrar la viabilidad de mapear y monitorizar rasgos de la superficie de la Tierra a partir de imágenes orbitales, convirtiéndose en el primer programa de satélite de sensor remoto destinado exclusivamente a la cartografía y evaluación de los recursos terrestres (USGS, 2016).

Martínez (2005) expone que esta familia de satélites, denominada Landsat, a partir del segundo lanzamiento en 1975, ha constituido uno de los proyectos más fructíferos de teledetección espacial; la buena resolución de sus sensores, el carácter global y periódico de las observaciones que realizan y su buena comercialización, explican su gran empleo por parte de expertos de muy variados campos a nivel mundial.

Tabla 1*Descripción de los satélites Landsat*

SATÉLITE	LANZAMIENTO (Fin de Operación)	SENSORES	RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)	ALTURA (km)
ERTS-1	23/07/1972	RBV	80	917
	(06/01/1978)	MSS	80	
Landsat-2	22/01/1975	RBV	80	917
	(27/07/1983)	MSS	80	
Landsat-3	05/03/1978	RBV	80	917
	(07/09/1983)	MSS	80	
Landsat-4	16/07/1982	MSS	80	705
	(14/12/1993)	TM	30	
Landsat-5	01/03/1984	MSS	80	705
	(enero 2013)	TM	30	
Landsat-6	03/10/1993	ETM	15 (Pan)	705
	(no entró en órbita)		30 (MS)	
Landsat-7	15/04/1999	ETM+	15 (Pan)	705
	(en órbita)		30 (MS)	
Landsat-8	11/02/2013	OLI	15(Pan)	705
	(en órbita)	TIRS	30(MS)	

Sistema de Referencia Mundial

El sistema de referencia Mundial (WRS: Worldwide Reference System, por sus siglas en inglés) es un sistema de notación global para los datos del satélite Landsat. Dicho sistema de referencia permite al usuario obtener información sobre imágenes de satélite sobre cualquier parte del mundo mediante la especificación de un centro de escena nominal designado por números en una fila y columna (*PATH* y *ROW*). El WRS ha demostrado ser valioso para el uso de catalogación, referenciación, y el día a día de las imágenes transmitidas desde los sensores Landsat (NASA, 2016).

La combinación de un número de fila y un número de columna, identifica de forma exclusiva un centro de escena nominal. El número de la trayectoria se da siempre primero, seguido por el número de fila. Los satélites Landsat 4, 5, 7 y 8 siguen el sistema WRS-2, el cual es una extensión del sistema WRS-1 de Landsat 1, 2 y 3 y utiliza un sistema fila/ columna ordenado de una manera similar.

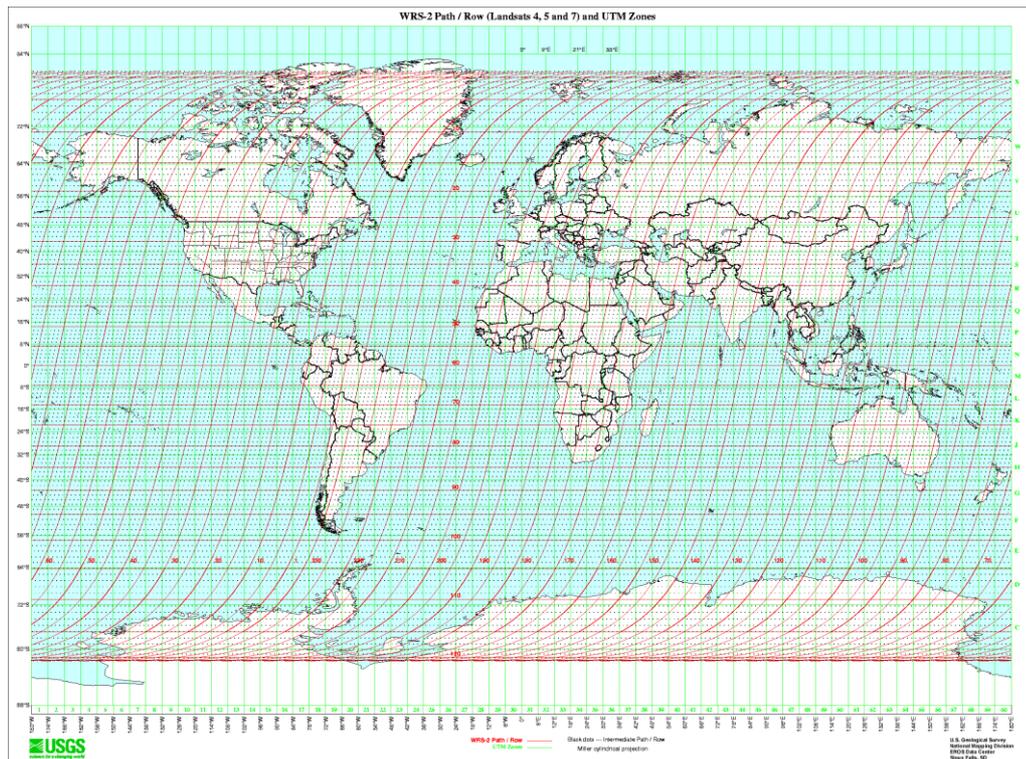


Figura 2. Sistema de referencia mundial descendente WRS-2.

Fuente: NASA, 2016

Sistema de Información Geográfica (SIG)

Un Sistema de Información Geográfico, conocido por los acrónimos SIG o GIS (Geographic Information System), es una integración de hardware y software que posee la capacidad de recolectar, almacenar, editar, manejar, analizar y representar en todas sus formas información geográficamente referenciada. Es importante destacar que el análisis de estos datos puede implicar la elaboración y aplicación de complejos modelos (Olaya, 2011)

Cuenca Hidrológica

La Ley de Aguas de la República Bolivariana de Venezuela (2007) expone:

Es una unidad territorial que está delimitada por líneas divisorias de aguas superficiales que convergen hacia un mismo cauce, y conforman espacios en el cual se desarrollan complejas interacciones e interdependencias entre los componentes bióticos y abióticos, sociales, económicos y culturales, a través de flujo de insumos, información y productos.

Ciclo Hidrológico

Se denomina Ciclo Hidrológico al movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea. Siendo así un proceso global por el cual se considera al agua un recurso natural renovable debido a que en esa circulación espontánea y continua el líquido vital se purifica y retorna temporalmente a sus fuentes, colocando el agua al alcance de sus múltiples demandantes

Balance Hídrico

La Ecuación de continuidad, o de balance hidrológico, es la ley más importante en Hidrología, y aunque su expresión es muy simple, la cuantificación de sus términos es normalmente complicada, principalmente por la falta de mediciones directas en campo y por la variación espacial de la evapotranspiración, de las pérdidas profundas (a acuíferos) y de las variaciones del agua almacenada en una cuenca. Como respuesta a estas dificultades, generalmente se admiten dos asunciones:

- a. Supone que las pérdidas profundas son despreciables (se considera, por tanto, que la cuenca es impermeable).
- b. Admite que las variaciones del agua almacenada en la cuenca son despreciables para un período suficientemente largo (normalmente un año).

La evapotranspiración puede ser determinada por la medición de varios componentes del balance hídrico del suelo. Este método consiste en determinar las entradas y salidas del flujo de agua en la zona del suelo ocupada por las raíces en un determinado intervalo temporal. Los aportes de agua vienen dados por el riego (R) y la lluvia (P), mientras que las pérdidas pueden ser por escorrentía superficial (Es) y percolación profunda (D). Además, si el nivel freático se encuentra a escasa profundidad de las raíces, también aportará agua el ascenso capilar, mientras que en caso de pendientes en el terreno habría que considerar entradas y salidas de flujos subsuperficiales (Fs). Finalmente, la evaporación desde el suelo y la transpiración desde las plantas extraen agua de la zona de las raíces. Si todos estos flujos son medidos, la evapotranspiración puede deducirse, teniendo también en cuenta el cambio en el almacenamiento de agua en el suelo (Δw), para cuya determinación se pueden emplear técnicas de gravimetría. La Ecuación del balance hídrico presenta la siguiente forma:

$$ET = R + P - Es - D - Fs + \Delta w \quad Ec. (1)$$

Este balance hídrico del suelo suele emplearse para estimar la evapotranspiración en períodos semanales o superiores (Allen et al., 1998).

$$PH = P - ET \quad Ec. (2)$$

donde:

- PH es la producción hídrica
- P es la precipitación
- ET es la evapotranspiración

Precipitación

La cantidad de agua que cae a la superficie terrestre procedente de la atmósfera, se denomina precipitación. La misma puede ser en forma de líquida, como la lluvia o llovizna; o sólida, como la nieve o el granizo. La precipitación

junto a la temperatura, son el principal elemento del clima, debido a que estas tienen gran incidencia en el medio natural y en la vida de las personas.

La precipitación constituye la principal entrada de agua dentro del Ciclo Hidrológico, y varía tanto espacial como temporalmente en una cuenca y subcuenca. El agua que cae en una zona determinada es la que delimita como una cuenca o subcuenca y puede ocurrir como lluvia, neblina, nieve, rocío, etc. La medición de la lluvia se realiza en las estaciones climáticas a través de instrumentos llamados pluviómetros y es uno de los datos necesarios para el balance que con mayor frecuencia se encuentran disponibles, con estas mediciones se elaboran las isoyetas de precipitación promedio anual característico de la cuenca, así como el climograma general de la misma para observar la relación entre precipitación y temperatura promedio mensual a través del año. La información de los mapas de isoyetas mensuales y anuales, permite calcular la precipitación media en determinadas áreas de las cuencas, con los que se inicia el cálculo de los parámetros del Balance Hídrico.

Evaporación

La evaporación es el proceso físico por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, retornando directamente a la atmósfera en forma de vapor. “La evaporación se produce desde cualquier superficie húmeda, sea ésta suelo desnudo o cubierto de vegetación, superficies impermeables como techos y pavimentos, superficies de agua en reposo o corrientes. La tasa de evaporación varía con el color y las propiedades de Reflectancia de la superficie (albedo) y dependiendo si la superficie está o no directamente expuesta a la radiación solar” Guevara (2004). Entre los principales factores que influyen sobre este proceso se encuentran la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa. La radiación solar proporciona a las moléculas de agua la energía necesaria para el mencionado cambio de estado.

Radiación Solar

La mayor parte de la energía que llega a nuestro planeta procede del Sol, él cual emite energía en forma de radiación electromagnética. Estas radiaciones se distinguen por sus diferentes longitudes de onda. Algunas, como las ondas de radio, pueden alcanzar longitudes de onda de kilómetros, mientras que las más energéticas, como los rayos X o las radiaciones gamma tienen longitudes de onda de milésimas de nanómetro. La energía que llega al exterior de la atmósfera lo hace en una cantidad fija, llamada constante solar. Esta energía es una mezcla de radiaciones de longitudes de onda entre 200 y 4000 nm, que se distingue entre radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja.

a. Radiación ultravioleta

Es aquella que lleva menor longitud de onda (360 nm), lleva mucha energía e interfiere con los enlaces moleculares, especialmente las de menos de 300 nm que pueden alterar las moléculas de ADN, muy importantes para la vida. Estas ondas son absorbidas por la parte alta de la atmósfera, especialmente por la capa de ozono, asimismo, es importante tener especial cuidado cuando se desarrollan nubes cúmulos, ya que éstas pueden llegar a actuar como espejos y difusores e incrementar las intensidades de los rayos ultravioleta y por consiguiente el riesgo solar. Algunas nubes tenues pueden tener el efecto de lupa.

b. Luz visible

Es la radiación que correspondiente a la zona visible cuya longitud de onda está entre 360 nm (violeta) y 760 nm (rojo), por la energía que lleva, tiene gran influencia en los seres vivos. La luz visible atraviesa con bastante eficacia la atmósfera limpia, pero cuando hay nubes o masas de polvo parte de ella es absorbida o reflejada.

c. Radiación infrarroja

La radiación infrarroja de más de 760 nm, es la que corresponde a longitudes de onda más largas y lleva poca energía asociada. Su efecto aumenta la agitación de las moléculas, provocando el aumento de la temperatura. El CO₂, el vapor de agua y las pequeñas gotas de agua que forman las nubes absorben con mucha intensidad las radiaciones infrarrojas. La atmósfera se desempeña como un filtro ya que mediante sus diferentes capas distribuye la energía solar para que a la superficie terrestre sólo llegue una pequeña parte de esa energía. La parte externa de la atmósfera absorbe parte de las radiaciones reflejando el resto directamente al espacio exterior, mientras que otras pasarán a la Tierra y luego serán irradiadas; produciendo así el denominado balance térmico, cuyo resultado es el ciclo del equilibrio radiante.

Tabla 2

Radiación recibida y absorbida por la Tierra. Fuente: Red Social Nacional

Radiación recibida por la Tierra	Porcentaje (%)	Radiación absorbida por la Tierra	Porcentaje (%)
directa a la Tierra	26%	por la atmósfera	16%
indirecta a la Tierra.	11%	por las nubes.	2%
difusa a la Tierra.	14%	por ozono y otros gases.	1%
pérdida de radiación por reflexión.	4%		
Total de radiación	47%		19%

Tabla 3.

Energía Solar reflejada. Fuente: Red Social Nacional

Energía Solar reflejada	Porcentaje (%)
Radiación reflejada por los materiales terrestres (Indirectamente)	10%
Radiación reflejada por las nubes (directamente)	24%
Total	34%

En las Tablas anteriores, se observa cómo se distribuye el 100% de la energía proveniente del sol, en la Tabla 2, indica que un 34% regresa al espacio exterior, de los cuales 24% lo hace de forma directa y un 10% de forma indirecta. Un 19% de la energía es absorbida por la atmósfera, mientras que la Tierra recibe un 47%; ambas serán regresadas al espacio exterior. Esta distribución de la energía hace posible el balance energético en la Tierra.

Según el tipo de radiación se conoce que de los $324 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ que llegan a la tierra; $236 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ son emitidos nuevamente al espacio en forma de radiación infrarroja, $86 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ son reflejados por las nubes y $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ son reflejados por el suelo en forma de radiaciones de onda corta. A su vez, el reenvío de energía no se hace directamente, sino que parte de la energía reemitida que es absorbida por la atmósfera y devuelta a la superficie, originándose el "efecto invernadero".

Temperatura del aire

La cualidad de la atmósfera que indica la cantidad de energía solar retenida por el aire en un momento dado se denomina *Temperatura*. El termómetro es el instrumento de fiabilidad que se utiliza para medir esa cantidad de energía. Esta medición debe realizarse a 1,5 metros del suelo, llevándose a cabo en un lugar ventilado y protegido de la influencia directa de los rayos del sol. El resultado de

ello se expresa en una escala centígrada o en grados Celsius, o bien en la escala Fahrenheit.

Se puede afirmar que las temperaturas dependen ante todo de la radiación solar. Es por esto que durante el día las temperaturas son más elevadas que las temperaturas de la noche, ya que en este último el sol permanece oculto; por este motivo las regiones tropicales, son las zonas del planeta que tienen insolación más intensa, es decir, hace más calor que en aquellas zonas donde esta insolación es menor, como por ejemplo en las zonas polares.

No obstante, son tres los factores del clima que hacen variar la temperatura, ellos son: la altitud, la latitud y la proximidad al mar, pero además se debe agregar en la influencia de los cambios térmicos a los movimientos de rotación y traslación de la tierra. En cuanto al movimiento de rotación, este es el responsable de la alternancia del día y la noche, por lo que es causante también de que diariamente se registre una temperatura máxima (en el momento de mayor insolación y siempre corresponde con el mediodía o las primeras horas de la tarde) y por lo tanto también una temperatura mínima, que suele tener lugar en la madrugada, cuando se da el momento de mayor pérdida de calor en la superficie terrestre.

Adicionalmente, el movimiento de traslación de la tierra es el responsable de las alternancias de estaciones en el año, desde el verano en el cual se registran las temperaturas más altas, hacia el invierno donde se registran las mediciones de temperaturas más bajas. Sin embargo, para caracterizar con mayor precisión los climas del mundo se utilizan todas esas cifras registradas durante un largo período de tiempo, logrando obtener valores medios.

Por otra parte, para analizar la distribución de las temperaturas sobre la superficie terrestre, se utilizan líneas imaginarias que unen puntos desde la superficie de estudio donde la temperatura media sea la misma. *A esas líneas se denominan isotermas.*

Velocidad del viento

Uno de los factores que influye en la evapotranspiración es el viento, ya que a mayor viento circule por la superficie mayor será la evapotranspiración. El viento es el aire en movimiento, el cual se produce en dirección horizontal, a lo largo de la superficie terrestre. La dirección, depende directamente de la distribución de las presiones, pues el viento tiende a soplar desde la región de altas presiones hacia la de presiones más bajas.

El viento produce energía porque está siempre en movimiento. Se estima que la energía contenida en los vientos es aproximadamente el 2% del total de la energía solar que alcanza la tierra. El contenido energético del viento depende de su velocidad. Cerca del suelo, la velocidad es baja, aumentando rápidamente con la altura. Cuanto más accidentada sea la superficie del terreno, más frenará ésta al viento. Es por ello que sopla con menos velocidad en las depresiones terrestres y más sobre las colinas. No obstante, el viento sopla con más fuerza en el mar que sobre la tierra.

El instrumento que mide la velocidad del viento, es el *anemómetro*, que generalmente está formado por un molinete de tres brazos, separado por ángulos de 120° que se mueve alrededor de un eje vertical. Los brazos giran con el viento y accionan un contador que indica en base al número de revoluciones, la velocidad del viento incidente.

Humedad relativa

La humedad relativa es el porcentaje de saturación de un volumen específico de aire y a una temperatura específica, la cual depende de la temperatura y la presión del volumen de aire analizado. Es una unidad cuyo valores expresan si el aire está completamente seco (cero por ciento) o si se encuentra completamente saturado (cien por ciento) o una variación entre esos extremos. También se puede definir como la relación de presiones parciales entre la presión de vapor del agua y la presión de saturación del vapor del agua con relación al agua, o con relación al hielo, a la misma presión atmosférica y la misma temperatura, describiendo la

cantidad de agua que se transporta por el aire. Su valor es una cifra porcentual que especifica la cantidad máxima posible de vapor de agua actualmente en el aire. Por lo tanto, la definición matemática es:

$$RH = \frac{E(T_d)}{E(T)} * 100 \quad Ec. (3)$$

Donde:

- RH humedad relativa (%)
- $E(T_d)$ presión de vapor saturado en el punto de rocío T_d (g/m^3);
- $E(T)$ presión de vapor de saturación a la (real) temperatura del aire T (g/m^3).

Punto de rocío

Por definición, es la temperatura del aire en el que un volumen específico de aire (presión constante) se condensa transformándose de vapor de agua en agua en estado líquido con la misma velocidad que se evapora; en este momento es el punto en que el rocío comienza a formarse en una superficie sólida (por ejemplo, gotas de agua sobre la hierba que aparecen en la madrugada). Esto también significa que la presión de vapor es igual a la presión de vapor saturado. Si la humedad relativa es del 100%, la temperatura del punto de rocío es la misma que la temperatura del aire y por lo tanto el aire está saturado. Si la temperatura disminuye, y la cantidad de vapor de agua permanece constante, el agua comenzará a condensarse. El agua condensada se llama rocío por lo que se convierte en una superficie sólida; mientras que el punto de rocío es la temperatura a la que el agua se condensa, el punto de rocío forma parte de la medida de la humedad.

Transpiración

Es el proceso físico-biológico mediante el cual el agua retenida en la estructura vegetal cambia de estado líquido a gaseoso a través de la superficie radicular de las plantas y pasa a la atmósfera. En esencia es el mismo proceso físico

que la evaporación, excepto que la superficie desde la cual se escapan las moléculas del líquido no es el agua libre sino que es la superficie de las hojas.

Evapotranspiración

Es el total de agua convertido en vapor por una cobertura vegetal; incluye la evaporación desde el suelo, la evaporación del agua interceptada y la transpiración por las estomas de las hojas. La evapotranspiración, es la combinación de dos procesos separados que originan pérdida de agua:

- **Evaporación:** es el proceso por el cual el agua en estado líquido es convertida en vapor de agua (vaporización); esto se logra a través de la energía requerida para cambiar el estado de las moléculas de agua a vapor es la radiación solar directa, la temperatura ambiental del aire.
- **Transpiración:** consiste en la vaporización del agua en estado líquido contenida en las plantas y el vapor removido a la atmósfera. La pérdida del agua ocurre a través de las estomas de las plantas.

La transpiración, depende de la energía radiante, el gradiente de presión de vapor y viento, la radiación, la temperatura del aire, la humedad del aire y viento. La razón de la transpiración también está influenciada por la característica de la vegetación, el aspecto del ambiente y la práctica de cultivo.

Los factores que influyen en la Evaporación son los siguientes:

- Radiación Solar
- Temperatura
- Humedad
- Presión Atmosférica: la altitud, la latitud y longitud
- Viento

La evaporación desde un suelo desnudo depende de:

- El poder evaporante de la atmósfera
- El tipo de suelo (textura, estructura, etc.)
- El grado de humedad del suelo

La transpiración está en función de:

- El poder evaporante de la atmósfera
- El grado de humedad del suelo
- El tipo de planta
- Variaciones estacionales
- Variaciones interanuales

La evapotranspiración es la combinación de los fenómenos de evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación. La dificultad de la medición en forma separada de ambos fenómenos (el contenido de humedad del suelo y el desarrollo vegetal de la planta) obliga a introducir el concepto de evapotranspiración como pérdida conjunta de un sistema determinado. Rayo & Cruz (2014) sostienen que la evapotranspiración (ET), es uno de los componentes más importantes del ciclo hidrológico, teniendo en cuenta que aproximadamente el 70% del agua que precipita es regresada a la atmósfera por este fenómeno.

La proporción de evaporación y transpiración en un cultivo varía en función de la etapa de desarrollo y crecimiento del mismo. Así, cuando el cultivo se encuentra en las primeras etapas de su desarrollo predomina el suelo desnudo y el principal proceso es el de evaporación. Por su parte, cuando el cultivo crece y logra cubrir totalmente la superficie del suelo, la transferencia de agua a la atmósfera estará representada principalmente por la transpiración.

Evapotranspiración potencial (ET_P)

Thornthwaite (1948) introdujo el término *evapotranspiración potencial* para expresar "la cantidad de agua que perderá una superficie completamente cubierta de vegetación en crecimiento activo si en todo momento existe en el suelo humedad suficiente para su uso máximo por las plantas". En otras palabras, es

aquella que se produciría si la humedad del suelo y cobertura vegetal estuvieran en condiciones óptimas.

Evapotranspiración real (ET_a)

El suministro de humedad a la superficie de evaporación es un factor determinante en la evapotranspiración. A medida que el suelo se seca, la tasa de evaporación cae por debajo del nivel que generalmente mantiene en un suelo bien humedecido. Es esta evapotranspiración que depende de la cantidad de humedad existente en el suelo, la que se denomina Evapotranspiración Real.

La evapotranspiración real es inferior a la evapotranspiración potencial por los siguientes factores:

- Falta de agua en algunos períodos
- Variación de la evapotranspiración según el desarrollo de la planta
- Variaciones de las condiciones atmosféricas como la humedad, la temperatura, etc.

Por lo tanto:

$$ET_r = K \cdot ET_p \quad Ec. (4)$$

Donde K es variable y oscila entre 0,10 y 0,90, aproximándose a 1 cuando la planta está en su máximo desarrollo de foliación y fruto.

Evapotranspiración de referencia (ET₀)

Se refiere a aquella evapotranspiración perteneciente a una superficie de referencia, correspondiente a un cultivo hipotético de gramíneas verdes bien regado, de crecimiento activo y uniforme, que cubre totalmente el suelo y cuyas características son las siguientes: altura asumida de 0,12m, resistencia superficial fija de 70s m⁻¹ y albedo de 0,23.

Evapotranspiración del cultivo (ETc)

La evapotranspiración de cultivo es aquella que se produce cuando no existe ninguna restricción de agua en el suelo y depende de las condiciones de los cultivos tales como sus características, el ritmo de desarrollo de las plantas (periodo vegetativo) y las condiciones climáticas de temperatura, viento y humedad relativa.

Para tener en cuenta los efectos de las características del cultivo sobre las necesidades de agua, se han desarrollado unos coeficientes de cultivo Kc, los cuales relacionan la evapotranspiración de referencia ETo con la evapotranspiración de cultivo ETc, y representan la evapotranspiración de un cultivo en condiciones óptimas, que produzca rendimientos óptimos.

$$ETc = Kc * ETo \quad Ec. (5)$$

donde:

- ETc: Evapotranspiración del cultivo (mm/día)
- ETo: Evapotranspiración de referencia (mm/día)
- Kc: Coeficiente de Cultivo (adimensional)

Las características del cultivo influyen en la pérdida de agua de las plantas a través de la evapotranspiración de acuerdo a la fisiología de las mismas, particularmente por el mecanismo de las plantas que oponen resistencia a la transpiración a través de las estomas de las hojas (las cuales permiten el intercambio de dióxido de carbono y oxígeno con el exterior). Existen plantas que presentan una buena regulación en la pérdida de agua, a través de mecanismos de cierre de sus estomas durante el día y su apertura en la noche cuando la temperatura es menor, perdiendo menor cantidad de agua que al abrir las estomas en el día.

Otro factor importante de pérdida de agua en las plantas es el período vegetativo, ya que las plantas pierden menor cantidad de agua a inicio de su desarrollo (germinación y crecimiento inicial), que cuando están en su fase de mediados del periodo, que corresponde a la etapa de maduración donde presenta un requerimiento hídrico mayor. Las características climáticas de viento y humedad

relativa también inciden en las pérdidas de agua por parte de las plantas. En zonas de mayor viento se produce mayor pérdida de agua, al igual que en zonas más secas y con temperaturas más elevadas.

Radiación Neta

La Radiación neta es imprescindible para el cálculo de la evapotranspiración tanto real como potencial, variables de alta importancia en el seguimiento y conocimiento de las propiedades de los ecosistemas terrestres y para el apoyo a la agricultura. Se define como radiación neta (R_n), el intercambio neto entre el total de radiación de onda corta y de onda larga que se recibe y que se emite o refleja en una superficie. Este, es el balance entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre, o bien, el balance entre la radiación neta entrante de onda corta y la radiación neta emitida de onda larga, (Cristóbal et al., 2009).

Flujo de Calor del Suelo

El flujo de calor del suelo (G), representa el transporte vertical de calor, a través del proceso de conducción, de las capas superiores del suelo hacia las capas más profundas, en periodo diurno y de forma inversa en los periodos nocturnos. El flujo de calor del suelo está altamente dependiente de las condiciones climáticas y consecuentemente de las condiciones de superficie (seca o húmeda expuesta a vegetada).

Flujo de Calor Sensible

El flujo de calor sensible, H , es la transferencia hidrodinámica del calor del aire, sobre todo por convección, entre la superficie del suelo y las capas de aire cercano a ella. Esta transferencia ocurre fundamentalmente por la diferencia de temperatura entre la superficie y la atmósfera.

Modelos

Como lo afirma Bunge (1985), la investigación científica arranca a partir de la percepción de que el acervo de conocimientos disponibles es insuficiente para resolver determinados problemas. A lo largo de la tarea de investigación es necesario, a menudo, tener que realizar simplificaciones de los problemas que se intentan resolver, para poder reducirlos a una serie limitada de variables que puedan ser manejables. En las áreas de conocimiento relacionadas con el medio ambiente, al ser tan amplio y variable la cantidad de factores que determinan el comportamiento de cada sistema, este proceso de selección de las variables a las que es más sensible el sistema y la eliminación del resto es una tarea imprescindible. Por ello, la forma más común de abordar estos problemas en el medio ambiente es utilizando modelos.

Un modelo de un sistema puede ser definido como una conceptualización del mismo que preserve las características esenciales para el fin que nos ocupa, sin necesidad de conservarlas todas (Andreu, 1993). Es decir, un modelo es una representación simplificada de la realidad (un sistema complejo) que puede ser manipulado para analizar la misma (Estrela, 1996). Por esto, la hidrología superficial (ciencia encargada del estudio de las aguas superficiales) requiere de modelos para representar el funcionamiento de los sistemas hidrológicos complejos.

Modelos determinísticos

Si un modelo no contiene ningún componente probabilístico (por ejemplo aleatoriedad), es llamado determinístico. En este tipo de modelos el resultado es determinado una vez que el conjunto de entradas cuantitativas y las relaciones con el modelo han sido especificados.

Sin embargo y en muchas ocasiones, en hidrología no se pueden conocer con exactitud todos los componentes del sistema y sus interrelaciones, aunque sí una buena parte de ellos. Un ejemplo de esto son los modelos de balance hídrico. Entre ellos, la variable de entrada es la precipitación y evapotranspiración, la

variable de salida es la producción hídrica, y ambos están relacionados por una serie de ecuaciones que representan con mayor o menor fidelidad.

El procedimiento a seguir para una modelación de un sistema hidrológico debe tomar en cuenta los siguientes parámetros generales: definición del problema a modelar, elección del tipo de modelo, calibración de los parámetros del modelo, validación de los parámetros, y simulación del modelo calibrado para la solución del problema planteado.

Calibración de los parámetros del modelo

Antes de la aplicación de una simulación del comportamiento hídrico, el modelo a aplicar debe ser ajustado a las condiciones meteorológicas, hidráulicas y morfológicas particulares de la zona a estudiar. Este procedimiento, necesario para realizar el proceso de ajuste donde uno o más parámetros que caracterizan el comportamiento del sistema cambian sus valores es conocido como la calibración.

Según Schwar, (2001) el objetivo de la calibración consiste en minimizar la diferencia entre las respuestas observadas del sistema y las respuestas simuladas por el modelo utilizado. En tanto, Llamas (1993) indica que la calibración es la etapa en la cual se calculan o se estiman los parámetros del modelo, con criterios deductivos o con ayuda de observaciones anteriores, considerando las demandas y las respuestas.

Los valores de los parámetros de los modelos son raramente conocidos en su totalidad, y en ocasiones son desconocidos por completo. Es necesario entonces proceder a su calibración. Esto significa elegir la combinación para la cual la correlación entre los valores de las variables de la salida generadas por el modelo y las medidas en el sistema real es coincidente.

Simulación del modelo

Una vez realizados los pasos de calibración y validación del modelo, se procede a dar los resultados deseados. Simular el comportamiento de una cuenca hidrológica con la ayuda de un modelo matemático cobra sentido cuando la

información obtenida con el mismo resulta imprescindible para lograr un objetivo difícilmente alcanzable por otros medios menos costosos. Los modelos facilitan la manipulación de las variables que intervienen en el proceso de conservación de energía, balance de energía superficial o el balance hídrico, los cuales aportan información sobre la distribución espacial de la producción hídrica.

Modelo SEBAL

El modelo de Algoritmo para el Balance de Energía Superficial, conocido por sus siglas en inglés, SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) fue desarrollado en 1995 por Win. Bastiaansen, WaterWatch, Wageningen, en los países bajos, posteriormente modificado en USA-IDAHO con el nombre de METRIC (2000).

El modelo SEBAL resuelve el balance de energía pixel a pixel, a partir de imágenes de satélite e información meteorológica básica. Determinando los componentes del balance de energía superficial al combinar parametrizaciones físicas y relaciones empíricas con una mínima cantidad de información de campo. La información clave para aplicar este modelo consiste en la radiancia espectral medida por los satélites en las regiones del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico del espectro electromagnético e información meteorológica de rutina como la velocidad del viento, temperatura del aire, radiación solar y humedad del aire.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad Ec. (6)$$

Donde:

- R_n : Radiación neta, expresada en W/m^2 .
- G : Flujo de Calor en el Suelo, expresado en W/m^2 .
- H : Flujo de Calor Sensible, expresado en W/m^2 .
- λET : Flujo de Calor Latente, expresado en W/m^2 .

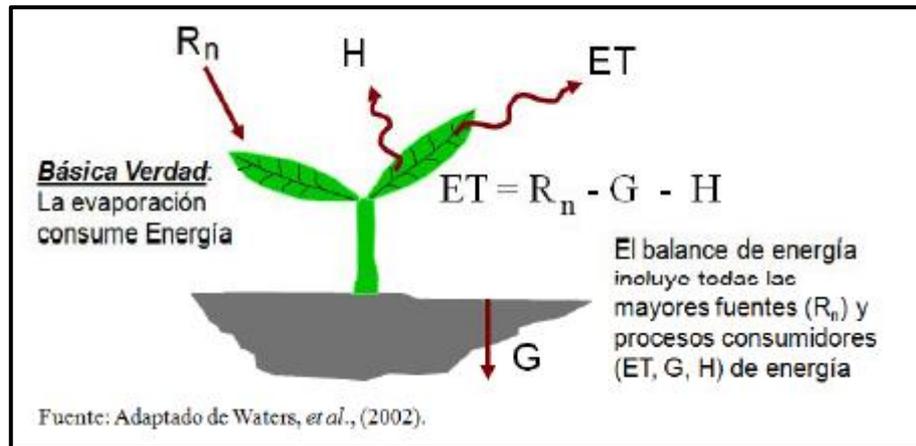


Figura 3 Balance de energía superficial.

Fuente: Manual SEBAL (2002)

En el modelo SEBAL, la radiación neta (R_n) es computada mediante la información de la radiancia espectral en las diferentes longitudes del espectro captada por los satélites de observación terrestre. Este modelo es aplicable sólo a imágenes de satélites que cuenten con una banda en la región del infrarrojo térmico, la cual servirá para estimar la temperatura de superficie. El Flujo de calor en el suelo (G) es estimado a través de la radiación neta, la temperatura de superficie y el cálculo de algunos índices de vegetación. El flujo de calor sensible (H) se ajusta mediante la selección de dos pixeles anclas tomados de la imagen, que representan condiciones extremas, uno de aridez (flujo de calor latente cercano a cero) y el otro de humedad (flujo de calor sensible cercano a cero). Con estos tres componentes se procede a calcular el flujo de calor latente (ET), como un residual del balance de energía para el momento de paso del satélite. Para la conversión de los valores instantáneos del ET a valores diarios (24horas) se usa la fracción de evaporación y la radiación neta diaria (R_{n24})

El modelo SEBAL mantiene algunas de las siguientes consideraciones conceptuales:

- SEBAL está basado en el principio de conservación de energía en el que la energía entrante es igual a la energía saliente.

- SEBAL requiere de imágenes de reflectancia y temperatura de superficie para su aplicación.
- Solo los flujos verticales son considerados.
- Los componentes menores de energía son ignorados.
- La Evapotranspiración (ET) es calculada como un residual del balance de energía.

Conversión de ND a Radiancia espectral

Esta conversión se realiza debido a que los datos contenidos en las imágenes satelitales (sean estas del satélite Landsat o cualquier otro) están representados por una serie cuantificada, calibrada y escalada de Niveles Digitales (DN), los cuales no representan ninguna variable biofísica por sí mismos, por lo que no es conveniente obtener ningún índice espectral mediante estos valores sin previo procesamiento. Uno de los métodos existentes para esto, recibe el nombre de “Método de escalamiento de la Radiancia espectral” y consiste en la aplicación de la siguiente fórmula:

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{CAL} + A_L \quad \text{Ec. (7)}$$

donde:

- L_{λ} : Radiancia espectral, expresada en $W/(m^2*sr*\mu m)$.
- M_L : factor multiplicativo de escalado específico obtenido del archivo de metadatos (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda).
- Q_{CAL} : Producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.
- A_L : factor aditivo de escalado específico obtenido del archivo de metadatos (RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda).

Conversión a Reflectancia en el tope de la atmósfera

Similar a la conversión a Radiancia espectral, la conversión a los valores de Reflectancia en el tope de la atmosfera (TOA) se realiza mediante el procesamiento de los Niveles Digitales (DN) y los coeficientes de Reflectancia re-escalados contenidos en el archivo de metadatos. Dicha conversión debe contener una corrección angular, ya que “la Reflectancia real de una cubierta captada por un sensor espacial está condicionado por el comportamiento de la atmósfera y del ángulo de observación” (Ariza, 2013). La Ecuación a utilizar para realizar este procedimiento es la siguiente:

$$\rho_{\lambda} = \frac{M_{\rho} * Q_{CAL} + A_{\rho}}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{M_{\rho} * Q_{CAL} + A_{\rho}}{\sin(\theta_{SE})} \quad \text{Ec. (8)}$$

donde:

- ρ_{λ} : Reflectancia en el tope de la atmosfera con corrección angular.
- M_{ρ} : factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del archivo de metadatos (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda).
- Q_{CAL} : Producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.
- A_{ρ} : factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del archivo de metadatos (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda).
- θ_{SE} : ángulo solar zenith local, complemento del ángulo de elevación solar.
- θ_{SZ} : ángulo de elevación solar, contenido en el archivo de metadatos (SUN_ELEVATION).

Albedo en el tope de la atmosfera

El albedo en el tope de la atmosfera (TOA) es el albedo no ajustado para la trasmisividad atmosférica y se calcula mediante la siguiente Ecuación:

$$\alpha_{TOA} = \sum \omega_{\lambda} * \rho_{\lambda} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$\omega_{\lambda} = \frac{ESUN_{\lambda}}{\sum ESUN_{\lambda}} \quad \text{Ec. (10)}$$

donde:

- α_{TOA} : albedo en el tope de la atmosfera.
- ω_{λ} : coeficiente ponderado para cada banda.
- ρ_{λ} : Reflectancia (Ecuación 2).
- $ESUN_{\lambda}$: Irradiancia solar exoatmosferica.

Para el caso de Irradiancia solar atmosférica ($ESUN_{\lambda}$), se presentan valores constantes para cada una de las bandas del satélite Landsat 7. Sin embargo, para el caso del satélite Landsat 8, el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS: U.S. Geological Survey, por sus siglas en inglés) no proporciona dichos valores, debido a que ya no son necesarios para la corrección atmosférica. Sin embargo, recomiendan el uso de la siguiente Ecuación para su estimación (ver anexo 3):

$$ESUN_{\lambda} = \pi * d^2 * \frac{RADIANCE_{MAXIMUM}}{REFLECTANCE_{MAXIMUM}} \quad \text{Ec. (11)}$$

donde:

- $ESUN_{\lambda}$: Irradiancia solar exoatmosferica para cada banda, expresada en $W/(m^2 * \mu m)$.
- d^2 : distancia relativa entre el sol y la tierra en unidades astronómicas (1 UA=1,49598 x 10⁸ km).
- $RADIANCE_MAXIMUM$: Radiancia máxima de cada banda obtenido del archivo de metadatos ($RADIANCE_MAXIMUM_BAND_x$, donde x es el número de banda).
- $REFLECTANCE_MAXIMUM$: Reflectancia máxima de la banda obtenida del archivo de metadatos

(REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_x, donde x es el número de la banda).

Albedo superficial

El albedo superficial se calcula mediante la aplicación de la Ecuación:

$$\alpha = \frac{\alpha_{TOA} - \alpha_{PATH-RADIANCE}}{\tau_{SW}^2} \quad \text{Ec. (12)}$$

donde:

- α_{TOA} : Albedo en el tope de la atmosfera (Ecuación 3).
- $\alpha_{PATH-RADIANCE}$: porción de radiación solar entrante a través de las bandas que es difundida hacia los satélites antes de que ésta alcance la superficie terrestre. Su valor varía en un rango de 0,0025 y 0,04. Sin embargo, el valor recomendado para la aplicación del modelo SEBAL es de 0,03 (Bastiaassen, 2000)
- τ_{SW} : Transmisividad atmosférica. (Allen et al., 2006) propone la siguiente Ecuación para su cálculo:

$$\tau_{SW} = 0,75 + 2 * 10^{-5} * z \quad \text{Ec. (13)}$$

donde:

- z: elevación del área de interés sobre el nivel del mar (msnm). Esta elevación dese ser la correspondiente a la estación meteorológica.

Índices de Vegetación

De forma genérica, se podría definir un índice de vegetación como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda y que pretende extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de las perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas (Gilabert et al., 1997). El término también

hace referencia a combinaciones de bandas espectrales registradas por los satélites de Teledetección, cuyo objetivo es realzar la vegetación en función de su respuesta espectral, atenuando las respuestas de otros componentes como la iluminación, el suelo, etc.

Índices de Vegetación de Diferencias Normalizadas

Conocido por sus siglas en inglés, el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas o NDVI, es un índice que arroja valores estimados de intensidad del verdor de la zona y da cuenta de la cantidad de vegetación presente en una superficie y su estado de salud o vigor vegetativo (Unasyuva, 2011). El NDVI proporciona valores adimensionales, los cuales varían dentro de un intervalo de (-1) y (1). De ellos, los valores negativos pertenecen a nubes, cuerpos de agua y zonas de suelo desnudo.

En condiciones normales, la vegetación sana tiene reflectancia baja en la porción del espectro electromagnético correspondiente al visible y alta en el espectro NIR, debido a que la mayor parte de la energía de ese tipo que llega a las plantas es absorbida, y una cantidad menor es reflejada. Por el contrario, cuando la vegetación se encuentra bajo estrés (falta de agua, falta de nutrientes, etc), tiende a absorber menos radiación solar en el espectro visible, aumentando sus valores de reflectancia, absorbiendo más en el NIR. Como consecuencia de esto, la diferencia de las reflectancias, $\rho_{\lambda_{NIR}} - \rho_{\lambda_R}$, decrecerá cuando la vegetación se vea afectada por alguno de los factores causantes de estrés.

Es importante resaltar que la interpretación del índice debe tomar en cuenta los ciclos fenológicos y de desarrollo anuales para poder diferenciar las oscilaciones naturales de la vegetación de los cambios en la distribución espacio-temporal causados por otros factores. Asimismo, se deben tomar en cuenta las siguientes premisas:

- El agua tiene reflectancia $\rho_{\lambda_R} - \rho_{\lambda_{NIR}}$ y, en consecuencia, valores negativos de NDVI.

- El suelo desnudo y con vegetación rala presenta valores positivos aunque no muy elevados.
- La vegetación densa, húmeda y bien desarrollada presenta los mayores valores de NDVI.
- La atmosfera, en especial las nubes, influyen sobre las señales de ambas reflectancias en estudio, tendiendo a disminuir el valor real de NDVI.

El Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas, se calcula mediante la siguiente Ecuación:

$$NDVI = \frac{(\rho_{\lambda})_{NIR} - (\rho_{\lambda})_R}{(\rho_{\lambda})_{NIR} + (\rho_{\lambda})_R} \quad \text{Ec. (14)}$$

donde:

- $\rho_{\lambda_{NIR}}$: Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano de la imagen satelital.
- ρ_{λ_R} : Reflectancia en la banda roja de la imagen satelital.

Índice de Vegetación Ajustado al Suelo

El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), se desarrolló debido a la necesidad de disminuir las alteraciones del valor arrojado por el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) al estudiarse en zonas áridas, ya que el mismo valor de NDVI puede corresponder a cubiertas vigorosas poco densas, o a cubiertas densas pero con poca vitalidad. Este índice entonces está indicado para el trabajo en zonas semiáridas, donde la contribución del suelo es muy importante, minimizando el efecto de la reflectancia del suelo mediante la introducción de un factor de ajuste. Huete (1988) propone la siguiente Ecuación para su estimación:

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_4 - \rho_3)}{L + \rho_4 + \rho_3} \quad \text{Ec. (15)}$$

donde:

- ρ_4 : Reflectancia en la banda 4 (Ecuación 2)
- ρ_3 : Reflectancia en la banda 3 (Ecuación 2)
- L: constante para ajustar la línea de vegetación - suelo al origen. Puede tomar valores entre 0 y 1, dependiendo de la densidad de la vegetación (valores más altos del índice, para densidades más bajas).
 - L=0: SAVI=NDVI
 - L=1: para muy bajas densidades de vegetación.
 - L=0,5: para densidades de vegetación intermedias.

No obstante, la Ecuación sólo ha sido calibrada para el suelo del sur de Idaho, Estados Unidos, por lo que no es de uso universal. Para dicha calibración, fue usado un valor de L igual a 0,1 debido a que la desviación estándar fue mínima para las cinco condiciones de suelo que fueron evaluadas en dicha región. Por lo tanto, el valor de L usado en esta investigación es de 0,1.

Índice de Área Foliar

Conocido por sus siglas en inglés, el Índice de Área Foliar (LAI) es un parámetro adimensional que está definido por la razón entre el área foliar de toda la vegetación por unidad de área utilizada por la vegetación. El LAI es un indicador de la biomasa de cada pixel de la imagen (SEBAL, 2002). El máximo valor que puede tomar es de 6,0 por lo que esto corresponde a un SAVI de 0,687. Esto se debe a que más allá del valor mencionado, los valores de SAVI se “saturan” con el aumento del LAI y no cambian significativamente.

$$LAI = \frac{\ln\left(\frac{0,69-SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad \text{Ec. (16)}$$

donde:

- LAI: Índice de Área Foliar
- SAVI: Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (ver Ecuación 15)

Emisividad

La emisividad, ϵ , hace referencia a la relación entre la energía térmica irradiada por la superficie a la energía térmica radiada por un cuerpo negro a la misma temperatura. Dentro del modelo SEBAL se utilizan dos tipos de emisividad; el primer tipo de emisividad, expresada como ϵ_{NB} , representa el comportamiento de la superficie de emisión térmica en la banda relativamente estrecha 6 del satélite Landsat (10,4 a 12,5 micras). Esta emisividad es usada para el cálculo de la Temperatura de superficie (T_s).

Por su parte, el segundo tipo hace referencia al comportamiento superficial de emisividad que representa para la emisión térmica en el amplio espectro térmico (6 a 14 micras), expresada como ϵ_0 . Esta emisividad es usada como base para el cálculo de la emisión total de radiación de onda larga de la superficie. Ambas emisividades se calculan usando las siguientes ecuaciones empíricas, donde el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas, NDVI es mayor a cero (0):

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,003 * LAI \quad ; \text{ Para } LAI < 3 \quad \text{Ec. (17)}$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 * LAI \quad ; \text{ Para } LAI < 3 \quad \text{Ec. (18)}$$

$$\epsilon_{NB} = 0,98 \text{ y } \epsilon_0 = 0,98 \quad ; \text{ Para } LAI \geq 3 \quad \text{Ec. (19)}$$

donde:

- ϵ_{NB} : Emisividad que representa el comportamiento de la superficie de emisión térmica en la banda relativamente estrecha 6 del satélite Landsat.
- ϵ_0 : Emisividad que representa para la emisión térmica en el amplio espectro térmico
- LAI: Índice de Área Foliar, adimensional.

En el caso de agua y nieve, se usan los siguientes “filtros” para estimar el valor de las emisividades:

- Para el agua; $NDVI < 0$ y $\alpha < 0,47$: $\epsilon_{NB} = 0,99$ y $\epsilon_0 = 0,985$
- Para la nieve; $NDVI < 0$ y $\alpha \geq 0,47$: $\epsilon_{NB} = 0,99$ y $\epsilon_0 = 0,985$

Radiancia térmica corregida

La Radiancia térmica corregida desde la superficie, R_C , es la radiancia emitida por ella. Es importante tomar en cuenta que entre el satélite y la superficie ocurren dos cosas: en primer lugar ocurre que parte de la radiación emitida es interceptada por la atmósfera (emisividad). En segundo lugar, ocurre que parte de la radiación térmica es emitida por la atmósfera en la dirección del satélite; esto hace que el satélite suponga que se trata de la superficie y que esta radiación sea confundida como emitida desde ella. Para el cálculo de la Radiancia térmica corregida, Wukelic et al.(1989) propone la siguiente Ecuación:

$$R_C = \frac{L_6 - R_P}{\tau_{NB}} - (1 - \epsilon_{NB}) * R_{SKY} \quad \text{Ec. (20)}$$

donde:

- R_C : Radiancia térmica corregida, expresada en $W/m^2/sr/\mu m$.
- L_6 : Radiancia espectral de la banda 6, expresada en $W/m^2/sr/\mu m$.
- R_P : Radiancia ruta en la banda (10,4 - 12,5 μm), expresada en $W/m^2/sr/\mu m$.
- τ_{NB} : Trasmisividad del aire de la banda estrecha (10,4 - 12,5 μm).
- ϵ_{NB} : emisividad. (ver Ecuación 19)
- R_{SKY} : Radiación térmica de la banda estrecha para un cielo despejado, expresada en $W/m^2/sr/\mu m$.

Los valores de R_P Y τ_{NB} requieren el uso de un modelo de simulación de transferencia de radiación atmosférica (como por ejemplo, MODTRAN) y de perfiles de radiosonda que representan la imagen y la fecha. Sin embargo, ante la falta de valores de estos términos, pueden ser ignorados estableciendo $R_P=0$ Y $\tau_{NB}=1$, así como R_{SKY} puede ser también ignorado asignándole el valor cero (0). Todo esto, convierte a R_C en una Radiancia sin corregir.

Afortunadamente, los efectos de los tres parámetros antes descritos se auto-cancelan, dentro de la expresión de R_C . Se debe tener presente que el resultado de la no corrección a L_6 será una subestimación general de temperatura de la superficie (T_s) por hasta aproximadamente $5^\circ C$ para los sectores más cálidos de la imagen. Sin embargo, debido a que el modelo SEBAL adapta una función en torno a los

datos de T_s calculado para una imagen, el impacto de los valores finales sobre la Evapotranspiración es generalmente pequeño, especialmente para las áreas que poseen valores bajos y altos de ET. No obstante, los errores pueden ser más grandes para los valores de ET de gama media, pero generalmente estos no superan un pequeño porcentaje.

Temperatura de la superficie

La temperatura de la superficie, T_s , se define como la energía térmica de onda larga que es emitida desde la superficie terrestre (Valor y Caselles, 1996; Sobrino, 2000; Rivas y Caselles, 2004), y se calcula mediante la siguiente Ecuación modificada de Plank:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{R_c} + 1\right)} \quad \text{Ec. (21)}$$

donde:

- T_c : Temperatura de la superficie, expresada en $mW/cm^2/sr/\mu m$.
- R_c : Radiancia térmica corregida desde la superficie (ver Ecuación 14)
- ϵ_{NB} : emisividad (ver Ecuación 19)
- K_1, K_2 : constantes correspondientes a la banda 6 de las imágenes del satélite Landsat 5 y 7, expresadas en $mW/cm^2/sr/\mu m$.

Temperatura de brillo en el satélite

En el caso del satélite Landsat 8, no es posible calcularse la Temperatura en la superficie directamente, sino que primero es necesario calcular la Temperatura de brillo en el satélite, la cual se define como aquella vista por el satélite bajo el supuesto de emisividad uniforme, pudiendo ser calculada mediante la siguiente Ecuación, la cual es una simplificación de la Ecuación de Plank (Markham and Barker, 1986):

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad \text{Ec. (22)}$$

donde:

- T: Temperatura de brillo en el satélite, expresada en K.
- L_λ : Radiancia espectral, expresada en $W/(m^2*srad*\mu m)$.
- K_1 : constante de conversión térmica, obtenida del archivo de metadatos (K1_CONSTANT_BAND_x), donde x es el número de la banda térmica, 10 u 11.
- K_2 : constante de conversión térmica, obtenida del archivo de metadatos (K2_CONSTANT_BAND_x), donde x es el número de la banda térmica, 10 u 11.

Tabla 4.

Valores de constantes de conversión térmica pertenecientes al satélite Landsat8.

SATELITE	BANDA	K_1 (mW/cm ² /sr/μm)	K_2 (mW/cm ² /sr/μm)
Landsat 8	10	774,89	1321,08
	11	480,89	1201,14

La transformación de Temperatura de brillo a Temperatura de la superficie, se realiza mediante la siguiente Ecuación (Weng et al., 2003):

$$T_s = \frac{T}{1 + \left(\frac{\lambda * T}{p}\right) * \ln(e)} \quad \text{Ec. (23)}$$

$$p = h * \frac{c}{\sigma} \quad \text{Ec. (24)}$$

$$e = 0,004 * P_v + 0,986 \quad \text{Ec. (24)}$$

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{MIN}}{NDVI_{MÁX} - NDVI_{MIN}} \right)^2 \quad \text{Ec. (25)}$$

donde:

- T_S : Temperatura de la superficie, expresada en K .
- T : Temperatura de brillo, expresada en K .
- λ : longitud de onda de radiación emitida, calculada como el promedio de los límites de la banda (Markham & Barker, 1985).
- e : emisividad (Sobrino et al., 2004)
- P_V : proporción de vegetación (grado de cobertura de vegetación)
- NDVI: Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (ver Ecuación 8)
- $NDVI_{MÍN}$: Valor mínimo del rango, obtenido del mapa que resulta de la aplicación del modelo de NDVI.
- $NDVI_{MÁX}$: Valor máximo del rango de NDVI, obtenido del mapa que resulta de la aplicación del modelo de NDVI.

Radiación de Onda Larga de Salida

La radiación de Onda Larga de Salida ($R_{L\uparrow}$), es el flujo de radiación térmica emitida por la superficie desde la tierra hacia la atmósfera, cuyos valores pueden variar desde 200 a 700 W/m^2 , dependiendo de la ubicación y la hora de la imagen. $R_{L\uparrow}$ se calcula mediante la Ecuación de Stefan-Boltzmann (SEBAL, 2002):

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_0 * \sigma * T_S^4 \quad \text{Ec. (26)}$$

donde:

- $R_{L\uparrow}$: Radiación de Onda Larga de Salida, expresada en W/m^2 .
- ϵ_0 : emisividad de la superficie “banda ancha” (adimensional).
- σ : constante de Stefan-Boltzmann, equivalente $5,67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$.
- T_S : Temperatura de la superficie, expresada en K . (ver Ecuación 22)

Radiación de Onda Larga Incidente

La radiación de onda larga entrante ($R_{L\downarrow}$) es el flujo de radiación térmica desde la atmósfera hacia la superficie. Su valor se estima a partir de una hoja de cálculo, mediante la aplicación de la Ecuación (22) de Stefan-Boltzmann (SEBAL, 2002):

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a * \sigma * T_{FRÍO}^4 \quad \text{Ec. (27)}$$

$$\varepsilon_a = 0,85 * [-\ln(\tau_{SW})^{0,09}] \quad \text{Ec. (28)}$$

donde:

- $R_{L\downarrow}$: Radiación de onda larga incidente, expresada en W/m^2 .
- ε_a : emisividad atmosférica (adimensional).
- σ : constante de Stefan-Boltzmann, equivalente $5,67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$.
- $T_{FRÍO}$: Temperatura del píxel “frío”, expresada en K .
- τ_{SW} : Transmisividad atmosférica (ver Ecuación 13).

Píxeles Ancla

El proceso SEBAL utiliza dos píxeles “ancla” para fijar las condiciones de contorno para el balance energético. Estos son los denominados píxeles “frío” y “caliente”, localizados dentro del área de interés. El píxel “frío” se selecciona como una superficie de cultivo húmedo, bien regada, cuya cobertura del suelo esté lleno de vegetación. La temperatura de la superficie y la temperatura del aire cerca de la superficie se suponen similares en este píxel.

Por su parte, el píxel “caliente” se selecciona como un campo agrícola en seco y desnudo, donde la ET es asumida como cero. Ambos píxeles “ancla” deben estar localizados en áreas grandes y homogéneas que contengan más de una banda de 6 píxeles (es decir 60m x 60m para Landsat 7 y 120m x 120m para Landsat 5). Es importante destacar que la selección de estos píxeles “ancla” requiere habilidad y práctica, ya que la calidad de los cálculos de la ET del modelo SEBAL depende de una cuidadosa selección de estos.

Radiación de Onda Corta Entrante ($R_{s\downarrow}$)

La Radiación de Onda Corta Entrante ($R_{s\downarrow}$) es el flujo de radiación solar directa y difusa que alcanza realmente la superficie de la tierra. Su valor se estima a partir de una hoja de cálculo, mediante la aplicación de la Ecuación (24) de Stefan-Boltzmann (SEBAL, 2002):

$$R_{s\downarrow} = G_{SC} * \cos\theta * d_r * \tau_{sw} \quad Ec. (29)$$

Donde:

- $R_{s\downarrow}$: Radiación de Onda Corta Entrante, expresada en W/m^2 .
- G_{SC} : constante solar cuyo valor es $1367 W/m^2$.
- θ : ángulo solar zenith local, complemento del ángulo de elevación solar.
- d_r : distancia relativa entre el sol y la tierra en unidades astronómicas ($1 UA=1,49598 \times 10^8 km$).
- τ_{sw} : Transmisividad atmosférica (ver Ecuación 13).

Radiación Neta (R_n)

Se entiende por radiación neta (R_n), el intercambio neto entre el total de radiación de onda corta y de onda larga que se recibe y que se emite o refleja en una superficie. Este, es el balance entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre, o bien, el balance entre la radiación neta entrante de onda corta y la radiación neta emitida de onda larga, (Cristóbal et al., 2009). La Radiación neta representa un lugar importante dentro de la estimación de la evapotranspiración tanto real como potencial, ya que estas son variables de alta importancia dentro del estudio, por ejemplo, de las propiedades de los ecosistemas terrestres.

$$R_n = (1 - \alpha) * R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) * R_{L\downarrow} \quad Ec. (30)$$

Flujo de Calor en el Suelo (G)

El Flujo de Calor en el Suelo (G) es la tasa de almacenamiento de calor en el suelo y la vegetación debido a la conducción. El modelo SEBAL calcula primero la relación G / R_n usando la siguiente Ecuación empírica desarrollada por Bastiaanssen (2000), la cual representa los valores cerca de mediodía:

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} * (0.0038 * \alpha + 0.0074 * \alpha^2) * (1 - 0.98 * NDVI^4) \quad Ec. (31)$$

donde:

- $\frac{G}{R_n}$: Relación Flujo de Calor en el Suelo/Radiación Neta.
- T_s : Temperatura de Superficie, expresada en K . (ver Ecuación 22)
- α : Albedo Superficial, adimensional. (ver Ecuación 12)
- NDVI: Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (ver Ecuación 14).

El Flujo de Calor en el Suelo es un término difícil de evaluar y se debe tener cuidado en su cálculo. Hay que entender el área de interés con el fin de evaluar la exactitud de la Ecuación (31). Los valores de G deben ser revisados contra pérdidas reales sobre el terreno. La clasificación de la tierra y el tipo de suelo afectan el valor de G , por lo que un mapa de uso del suelo es importante para la identificación de los distintos tipos de superficie. La Ecuación (31) predice valores de G para cultivos regados cerca de Kimberly, Idaho con muy buena precisión (M.Tasumi y R.Allen, 2002, com. commun.).

En las aplicaciones del modelo SEBAL en Idaho, los valores de G / R_n para el agua y la nieve se asignan de la siguiente manera, en representación de los valores cercanos a mediodía:

- Si $NDVI < 0$; se asume que la superficie es agua; $G / R_n = 0.5$

- Si $T_s < 4$ oC y $\alpha > 0,45$; se asume que la superficie es nieve; $G / R_n = 0.5$

Longitud de Rugosidad Superficial

Núñez (2009) expone que esta variable hace referencia a la altura de vegetación por sobre el plano desplazado definido como cero, que corresponde al plano donde la velocidad del viento es nula, cuando la cubierta vegetal termina. La longitud de rugosidad superficial es estimada para cada píxel y puede calcularse mediante dos métodos:

- **Mediante un mapa de uso del suelo:** Cuando se encuentra disponible un mapa de este tipo, los valores de esta variable para superficies no agrícolas como agua, bosque, desierto, hierba, nieve o estructuras hechas por el hombre, se pueden asignar utilizando valores predeterminados. Por su parte, los valores para áreas agrícolas, pueden ser calculados a través de la siguiente Ecuación:

$$z_{0m} = 0.018 * LAI \quad Ec. (32)$$

donde:

- Z_{0m} : Longitud de Rugosidad Superficial, adimensional.
- LAI: Índice de Área Foliar, adimensional.
- **Usando datos de albedo superficial y NDVI:** Cuando no se cuenta con mapa de usos de suelo, puede ser usado el segundo método para computar la longitud de rugosidad superficial, basado en datos de albedo superficial e Índice de Diferencia Normalizadas (NDVI), desarrollado por Bastiaanssen (2000) y modificado por Allen (2001). La Ecuación usada para la aplicación de este método es la siguiente:

$$z_{0m} = \exp \left[\left(a * \frac{NDVI}{\alpha} \right) + b \right] \quad Ec (33)$$

donde:

- Z_{0m} : Longitud de Rugosidad Superficial, adimensional

- NDVI: Índice de Diferencias Normalizadas, adimensional. (ver Ecuación #)
- α : Albedo superficial, adimensional. (ver Ecuación 12)
- NDVI/ α : Factor adimensional cuya función es distinguir tipos de vegetación altos y bajos que poseen valores de NDVI similares.
- a,b: Coeficientes de correlación. Para la determinación de estos, SEBAL se vale de dos píxeles “ancla”, denominados “píxel frío” y “píxel caliente”.

Flujo de Calor Sensible

Puede definirse el Flujo de Calor Sensible (H) como la tasa de transferencia hidrodinámica del calor del aire, por convección y conducción, entre la superficie del suelo y las capas de aire cercanas a ella. Dicha transferencia se lleva a cabo principalmente por la diferencia de temperatura entre la superficie y la atmósfera. Representa la variable más difícil de estimar dentro del modelo SEBAL, debido a que ésta depende de diversos factores y el desarrollo de un proceso iterativo cuyo propósito es determinar el valor de la resistencia aerodinámica a la transferencia de calor el cual considere los impactos de la inestabilidad atmosférica. El valor inicial de este parámetro es calculado mediante la aplicación de la siguiente Ecuación (Allen et al., 2002):

$$H = \frac{(\rho * c_p * dT)}{r_{ah}} \quad Ec. (34)$$

donde:

- H: Flujo de Calor Sensible, expresado en W/m^2 .
- ρ : densidad del aire, expresada en kg/m^3 .
- C_p : Capacidad de calor específico del aire, cuyo valor es constante y equivale a $1004 J/kg/K$.
- dT: Diferencia de temperaturas ($T_{z1} - T_{z2}$) entre dos alturas ($z_1 - z_2$).
- r_{ah} : Resistencia aerodinámica para el transporte de calor sensible entre la superficie y la altura de referencia, expresada en (s/m).

El modelo SEBAL repite el cálculo del Flujo de Calor Sensible H mediante un número de iteraciones, corrigiendo dentro de cada una los efectos de empuje, hasta que el valor de la resistencia aerodinámica al transporte de calor r_{ah} se estabilice, es decir su variación con respecto a su valor anterior sea de 0%. A continuación, se describen las fases que conforman el proceso iterativo, cuyo objetivo es calcular el Flujo de Calor Sensible H :

- **Velocidad de fricción u_* en la estación meteorológica.** Es necesario conocer la magnitud de esta variable, calculada bajo condiciones atmosféricas neutras (detalladas en el Anexo 6), mediante el uso de la siguiente Ecuación:

$$u_* = \frac{k * u_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{0m}}\right)} \quad Ec. (35)$$

donde:

- u_* : Velocidad de fricción en la estación meteorológica, expresada en m/s .
- k : constante de Von Karman, cuyo valor es constante y equivale a 0.41.
- u_x : Velocidad del viento a una altura z_x , expresada en m/s .
- z_x : Altura de la estación meteorológica, expresada en m .
- Z_{0m} : es una medida de la resistencia de forma y la fricción de la capa de aire que interactúa con la superficie cuyo valor se calcula mediante hoja de cálculo, adimensional. Esta es estimada de manera empírica a partir de la altura media de la vegetación alrededor de la estación meteorológica, mediante la siguiente Ecuación (Brutsaert, 1982):

$$Z_{0m} = 0,12 * h \quad Ec. (36)$$

donde:

- h : Altura de la vegetación, expresada en m . El valor propuesto para esta variable es de 0,3 el cual representa los alrededores de la estación meteorológica con base en la cual fue desarrollado el modelo SEBAL, los cuales constan de una pequeña extensión de 50m de pasto con otros cultivos agrícolas más altos.
- **Velocidad del viento a una altura sobre la estación meteorológica.** La altura a la que se estima el valor de esta velocidad, es conocida como “velocidad de mezcla” y generalmente equivale a 200 metros, debido a que se asume ningún efecto de la rugosidad de la superficie en dicho nivel. Su cálculo se realiza a partir de datos meteorológicos correspondientes a la fecha de la imagen en estudio y la aplicación de la siguiente Ecuación, la cual surge del reordenamiento de la Ecuación (35):

$$u_{200} = u_{*EM} * \frac{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right)}{k} \quad Ec. (37)$$

donde:

- u_{200} : velocidad del viento en la estación meteorológica a una altura de 200m, expresada en m/s .
- u_{*EM} : Velocidad de fricción en la estación meteorológica, expresada en m/s .
- Z_{0m} : es una medida de la resistencia de forma y la fricción de la capa de aire que interactúa con la superficie cuyo valor se calcula mediante hoja de cálculo, adimensional. (ver Ecuación 36).
- **Velocidad de Fricción para cada píxel.** Este cálculo está representado por un modelo dentro del algoritmo SEBAL y está desarrollado de acuerdo con la siguiente Ecuación:

$$u_* = \frac{k * u_{200}}{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right)} \quad Ec. (38)$$

donde:

- u_* : Velocidad de fricción, expresada en m/s .
 - k : constante de Von Karman, cuyo valor es constante y equivale a 0.41.
 - u_{200} : velocidad del viento en la estación meteorológica a una altura de 200m, expresada en m/s .
 - Z_{0m} : Longitud de Rugosidad Superficial, adimensional. (ver ecuaciones 32 y 33).
- **Resistencia aerodinámica al transporte de calor.** El cálculo de esta variable está incluida en el modelo SEBAL. las iteraciones son necesarias para la determinación del valor de esta variable para analizar cada período que considere los impactos de inestabilidad sobre esta y el Flujo de Calor Sensible H . Inicialmente, es necesario estimar un valor inicial de r_{ah} en hoja de cálculo (ver anexo 6) mediante la Ecuación que se muestra a continuación (39), asumiendo condiciones atmosféricas neutrales. Basado en aplicaciones previas, se recomiendan valores de z_1 y z_2 de 0,1 y 2m respectivamente, para ser aplicados dentro del modelo cuya estructura se basa en la Ecuación:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_* * k} \quad Ec. (39)$$

donde:

- r_{ah} : Resistencia aerodinámica para el transporte de calor sensible entre la superficie y la altura de referencia, expresada en (s/m).
- z_1, z_2 : Alturas sobre la superficie, expresadas en m. Bastiaanssen (1995) expone que sugiere que sean utilizados $z_1= 0.1m$, como una altura próxima al suelo y $z_2= 2.0 m$ como una altura estimada de la vegetación.
- u_* : Velocidad de fricción, expresada en m/s .

- k : constante de Von Karman, cuyo valor es constante y equivale a 0.41.

- **Diferencia de Temperatura Cerca de la Superficie.** Representa otra de las variables que necesitan ser definidas dentro del proceso iterativo. Su valor es calculado para cada píxel de la imagen y su Ecuación viene dada por:

$$dT = T_{z1} - T_{z2} \quad Ec (40)$$

Debido a que la temperatura del aire en cada píxel es desconocida, la Ecuación (40) no es aplicable. Sin embargo, debido a que el modelo SEBAL solo usa el gradiente de temperatura dT , se asume una relación lineal entre dicho gradiente de temperatura dT y la Temperatura de la Superficie T_s , (la cual es desarrollada en una de las etapas del modelo SEBAL). Esta relación lineal se desarrolla a partir de los píxeles “ancla” seleccionados para cada escena estudiada; uno completamente “caliente” donde no hay ET y otro completamente “frio” donde se espera un 100% de ET. Dicha relación presenta la siguiente forma:

$$dT = b + a * T_s \quad Ec. (41)$$

donde:

- dT : Diferencia de Temperatura de cada píxel, expresada en K
- T_s : Temperatura de la Superficie de cada píxel, expresada en K .
- a, b : Coeficientes de correlación. Para la determinación de estos, SEBAL se vale de dos píxeles “ancla” denominados “píxel frío” y “píxel caliente”, en los cuales pueda estimarse un valor fiable de Flujo de Calor Sensible H .

El Flujo de Calor Sensible para los píxeles “ancla” y los coeficientes de correlación son computados en hoja de cálculo (ver apéndice 6). El calor sensible en el píxel frío puede calcularse usando la Ecuación (34)

- **Temperatura del aire.** Se puede estimar un valor aproximado de esta variable para cada píxel, mediante la aplicación de la siguiente Ecuación:

$$T_a = T_s - dT \quad Ec. (42)$$

donde:

- T_a : Temperatura del aire, expresada en K .
- T_s : Temperatura de la superficie, expresada en K .
- dT : Diferencia de temperatura para cada píxel, expresada en K .

- **Densidad del aire.** La densidad del aire es calculada utilizando ecuaciones normales de presión atmosférica y la ley universal de los gases, mediante la siguiente Ecuación (Allen et al., 1998):

$$\rho_{aire} = \frac{1000 * P}{1,01 * (T_s - dT) * R} \quad Ec (43)$$

$$P = 101,3 * \left(\frac{293 - 0,0065 * z}{293} \right)^{5,26} \quad Ec. (44)$$

donde:

- ρ_{aire} : Densidad del aire, expresada en kg/m^2 .
 - P : media de la presión atmosférica para la elevación del píxel, calculada como una función exponencial (ASCE- EWRI, 2005).
 - $T_s - dT$: Corresponde a la temperatura del aire cerca de la superficie del píxel
 - R : Constante de gas específico, cuyo valor es $287 J kg^{-1} * K^{-1}$.
 - z : Altura de la estación meteorológica, expresada en m .
- **Longitud de Monin-Obukhov.** Esta longitud representa la altura a la que se igualan la fuerza de empuje y el mezclado del aire. La aplicación de esta teoría dentro del modelo SEBAL, tiene como objetivo definir las condiciones de estabilidad de la atmósfera dentro del proceso iterativo. La Ecuación para su cálculo es la siguiente (Allen et al, 2002) :

$$L = - \frac{\rho * C_p * u_* * T_s}{k * g * H} \quad Ec. (45)$$

donde:

- L: Longitud de Monin-Obukhov, expresada en
- ρ : densidad del aire, expresada en kg/m^3 .
- C_p : Capacidad de calor específico del aire, cuyo valor es constante y equivale a $1004 J/kg/K$.
- u_* : Velocidad de fricción, expresada en m/s .
- T_s : Temperatura de la superficie, expresada en K .
- k : constante de Von Karman, cuyo valor es constante y equivale a 0.41.
- g : constante gravitacional, cuyo valor equivale a $9.81 m/s^2$.
- H : Flujo de Calor Sensible, expresado en W/m^2 , el cual es estimado inicialmente suponiendo condiciones neutrales de la atmósfera mediante el uso de hoja de cálculo (ver anexo6).

Las condiciones de estabilidad de la atmosfera afectan de manera considerable la resistencia aerodinámica al transporte de calor r_{ah} , por lo que deben ser tomadas en cuenta dentro del cálculo del Flujo de Calor Sensible H .

En función de las condiciones atmosféricas, se deben realizar correcciones. Estas son conocidas como Corrección de Estabilidad Momentánea (Ψ_m) y Corrección de Estabilidad del Transporte de Calor (Ψ_h), las cuales se calculan mediante las ecuaciones propuestas por Paulson y Webb (1970). Con base en el valor de la Longitud de Monin-Obukhov, se considera que el límite más bajo de la atmósfera es inestable cuando $L < 0$. Por el contrario, se asume que dicho límite es estable cuando $L > 0$. Estas condiciones definen las ecuaciones a usar en el cálculo de los parámetros en cuestión, de la siguiente manera:

Cuando $L < 0$:

$$\psi_{m(200m)} = 2 * \ln \left(\frac{1+x_{(200m)}}{2} \right) + \ln \left(\frac{1+x_{(200m)}^2}{2} \right) - 2 * \tan^{-1}(x_{(200m)}) + 0,5 * \pi \quad Ec. (46)$$

$$\psi_{h(2m)} = 2 * \ln\left(\frac{1 + x_{(2m)}^2}{2}\right) \quad Ec. (47)$$

$$\psi_{h(0,1m)} = 2 * \ln\left(\frac{1 + x_{(0,1m)}^2}{2}\right) \quad Ec. (48)$$

donde:

$$x_{(200m)} = \left(1 - 16 * \frac{200}{L}\right)^{0,25} \quad Ec. (49)$$

$$x_{(2m)} = \left(1 - 16 * \frac{2}{L}\right)^{0,25} \quad Ec. (50)$$

$$x_{(0,1m)} = \left(1 - 16 * \frac{0,1}{L}\right)^{0,25} \quad Ec. (51)$$

Cuando $L > 0$:

$$\psi_{m(200m)} = -5 * \left(\frac{200}{L}\right) \quad Ec. (52)$$

$$\psi_{h(2m)} = -5 * \left(\frac{2}{L}\right) \quad Ec. (53)$$

$$\psi_{h(0,1m)} = -5 * \left(\frac{0,1}{L}\right) \quad Ec. (54)$$

donde:

- Ψ_m (200m): Corrección momentánea a la estabilidad de transporte a 200m. Corrección de estabilidad momentánea.
- Ψ_h (2m), Ψ_m (0,1 m): Corrección de Estabilidad del Transporte de Calor a los 2 metros y 0,1 metros, respectivamente.

La estimación de dichas estabilidades, sirve de base para el cálculo de la velocidad de fricción u^* , cuya magnitud cuantifica las fluctuaciones de velocidad turbulenta en el aire; esta variable debe ser calculada para cada iteración de manera sucesiva y se calcula mediante la aplicación de la siguiente Ecuación:

$$u_* = \frac{u_{200} * k}{\ln\left(\frac{200}{Z_{0m}}\right) - \Psi_{m(200m)}} \quad Ec (55)$$

donde:

- u^* : Velocidad de Fricción corregida, expresada en m/s .
- u_{200} : Velocidad del viento a una altura de 200 m, expresada en m/s .
- k : constante de Von Karma, cuyo valor es constante y equivale a 0.41.
- Z_{0m} : Longitud de Rugosidad Superficial, adimensional.
- $\Psi_{m(200m)}$: Corrección momentánea a la estabilidad de transporte a 200m.
Corrección de estabilidad momentánea.

Análogamente, se obtiene un valor corregido para la resistencia aerodinámica para el transporte de calor, rah , para cada iteración sucesiva, la cual es calculada a partir de la siguiente Ecuación:

$$rah = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_{h(z_2)} + \Psi_{h(z_1)}}{u_* * k} \quad Ec. (56)$$

Donde:

- z_2 : Altura equivalente a 2m.
- z_1 : Altura equivalente a 0,1m.
- $\Psi_{h(z_2)}$: Corrección de estabilidad al transporte de calor, para una altura de 2m.
- $\Psi_{h(z_1)}$: Corrección de estabilidad al transporte de calor, para una altura de 0,1m.
- u^* : Velocidad de Fricción corregida, expresada en m/s .
- k : constante de Von Karma, cuyo valor es constante y equivale a 0,41.

Flujo de Calor Latente (λE), ET Instantánea y Fracción Evaporativa.

Puede definirse el Flujo de Calor Sensible λE como la cantidad de calor perdido por la superficie como consecuencia de la evapotranspiración. Este parámetro se calcula para cada píxel de la imagen satelital, como un residuo del balance de energía, siendo este un valor instantáneo para el momento de captura de la imagen satelital por parte del satélite y cuyo cálculo se rige por la Ecuación (6).

Por su parte, el Calor Latente de Vaporización λ , se define como la cantidad de energía necesaria para vaporizar una unidad de masa de agua y su estimación depende de la Temperatura Superficial, tal como lo indica la Ecuación para su cálculo:

$$\lambda = [2,501 - 0,00236 * (T_s - 273,15)] * 10^6 \quad Ec. (57)$$

donde:

- λ : Calor Latente de Vaporización, expresado en $J*kg^{-1}$.
- T_s : Temperatura Superficial, expresada en K . (ver Ecuación 22)

Para obtener la Evapotranspiración Instantánea en términos de altura de agua evaporada, se debe dividir el Flujo de Calor Latente λE entre el Calor Latente de Vaporización λ , tal como lo indica su Ecuación (Bastiaanssen et al., 2002):

$$ET_{INST} = 3600 * \frac{\lambda E T}{\lambda} \quad Ec. (58)$$

Donde:

- ET_{INST} : Evapotranspiración Instantánea, expresada en mm/h .
- λE : Flujo de Calor Sensible, expresado en W/m^2 . (ver Ecuación 6)
- λ : Calor Latente de Vaporización, expresado en $J*kg^{-1}$. (ver Ecuación 57)

La fracción de la evapotranspiración es un término que equivale al coeficiente de cultivo, y se obtiene como la relación entre la evapotranspiración instantánea calculada y a la evapotranspiración de referencia, obtenida mediante datos meteorológicos obtenidos para el momento de captura de la imagen satelital. El modelo SEBAL, utiliza un término denominado Fracción Evaporativa, el cual representa al coeficiente de cultivo o Evapotranspiración de referencia antes mencionados. La Ecuación para su estimación tiene la siguiente estructura:

$$FE = \frac{ET_{INST}}{R_n - G} \quad Ec. (59)$$

donde:

- FE: Fracción Evaporativa, adimensional.
- ET_{INST} : Evapotranspiración Instantánea, expresada en *mm/día*.
- R_n : Radiación neta, expresada en *mm/día*.
- G: Flujo de Calor en el Suelo, expresado en *mm/día*.

Evapotranspiración Diaria (ET_{24})

Los valores de evapotranspiración diaria son a menudo más útiles que los valores de evapotranspiración instantánea. El modelo SEBAL estima este parámetro asumiendo que la Fracción Evaporativa se mantiene constante durante las 24 horas del día, mediante la siguiente Ecuación:

$$ET_{24} = \frac{FE * R_{nd}}{\lambda} * 86400 \quad Ec. (60)$$

donde:

- ET_{24} : Evapotranspiración diaria, expresada en *mm/día*.
- FE: Fracción Evaporativa, adimensional.
- λ : Calor Latente de Vaporización, expresado en $J*kg^{-1}$. (ver Ecuación 57)

- R_{nd} : Radiación neta diaria, expresada en W/m^2 . El modelo SEBAL, contiene un modelo independiente para el cálculo de esta variable, mediante la siguiente expresión:

$$Rn_d = [1 - (\rho_s * \alpha)] * K_{día} + L_{día} \quad Ec. (61)$$

donde:

- α : Albedo Superficial, adimensional. (ver Ecuación 12)
- $K_{día}$: Radiación de onda corta entrante media diaria, estimada mediante hoja de cálculo (ver anexo 6), expresada en W/m^2 .
- $L_{día}$: Radiación de onda larga entrante media diaria, estimada mediante hoja de cálculo (ver anexo 6), expresada en W/m^2 .

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe el tipo de investigación a desarrollar y se presentan secuencialmente las etapas y procedimientos ejecutados para lograr cada uno de los objetivos propuestos para el análisis de la variación espacio-temporal de la producción hídrica de la cuenca del Río Unare.

Tipo de investigación

La investigación es del tipo **descriptiva**, la cual es un tipo de investigación que está enmarcada en un modelo cuantitativo, por tanto se examinan los datos de forma numérica. Consiste, fundamentalmente, en caracterizar un fenómeno o situación concreta indicando sus rasgos más peculiares o diferenciadores.

Según Tamayo y Tamayo M. (Pág. 35), en su libro Proceso de Investigación Científica, la investigación descriptiva “comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, y la composición o proceso de los fenómenos. El enfoque se hace sobre conclusiones dominantes o sobre grupo de personas, grupo o cosas, se conduce o funciona en presente”.

Según Sabino (1986)

La investigación de tipo descriptiva trabaja sobre realidades de hechos, y su característica fundamental es la de presentar una interpretación correcta. Para la investigación descriptiva, su preocupación primordial radica en descubrir algunas características fundamentales de conjuntos homogéneos de fenómenos, utilizando criterios sistemáticos que permitan poner de manifiesto su estructura

o comportamiento. De esta forma se pueden obtener las notas que caracterizan a la realidad estudiada. (Pág. 51)

En esta investigación se describen las variables precipitación y evapotranspiración y se pretende distinguir el comportamiento de las mismas para luego analizar cómo influyen en la producción hídrica de la cuenca del Río Unare.

Diseño de Investigación

Marian Balestrini Acuña (Junio 2006), afirma

Existen muchas propuestas de clasificación... los no experimentales en el cual se ubican los estudios exploratorios, descriptivos, diagnósticos, evaluativos, los cuales incluimos a los proyectos factibles, donde se observan los hechos estudiados tal como se manifiestan en su ambiente natural, y en este sentido, no se manipulan manera intencional las variables. (p. 131)

De acuerdo a lo expuesto anteriormente la investigación se puede clasificar como una investigación **no experimental**, se observarán los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural para después analizarlos. Los fenómenos que serán observados en esta investigación son: evapotranspiración, precipitación.

Población y muestra de estudio

Para tener una idea de qué es la población, Marian Balestrini Acuña (Junio 2006), dice

...Desde el punto de vista estadístico, una población o universo puede estar referido a cualquier conjunto de elementos de los cuales pretendemos indagar y conocer sus características, o una de ellas... necesariamente los elementos de la población no tiene que estar referidos única y exclusivamente a individuos (hombres, mujeres o

niños), ejecutivos; pueden ser instituciones, animales, objetos físicos etc.; en función de la delimitación del problema y de los objetivos de la investigación. (p. 137)

Con respecto a la muestra, Marian Balestrini Acuña (Junio 2006), afirma

...La muestra estadística es una parte de la población, o sea, un número de individuos u objetos seleccionados científicamente, cada uno de los cuales es un elemento del universo. La muestra obtenida es obtenida con el fin de investigar, a partir del conocimiento de sus características particulares, las propiedades de una población. (Néstor Gabaldon Mejía: Op. Cit.; pág. 9)

“La muestra es, en esencia, un subgrupo de la población. Digamos que es un subconjunto de elementos que pertenecen a ese conjunto definido en sus características al que llamamos población (Marian B. 2006)” (Roberto Hernández Sampieri y otros, 1994, pág. 212)

Previo a lo anterior, se puede definir que la población estará enmarcada por la cuenca del río Unare. Por otra parte, la muestra de estudio está representada por las imágenes satelitales y los datos meteorológicos de la región, para así determinar las variables físicas que influyen en la producción hídrica de la cuenca del río Unare.

Técnicas de Recolección de Información

Para la recolección de la información es indispensable contar con una técnica de recolección de datos, que representa las distintas formas o maneras de obtener información. Los instrumentos, por su parte, son los medios materiales que se emplean para recoger y almacenar la información. Toda medición o instrumento de recolección de datos debe cumplir dos requisitos esenciales: confiabilidad y validez.

El objetivo general de la presente investigación, se basa en analizar la variación espacio temporal de la producción hídrica adaptada a la cuenca del Río Unare; para ello es necesario disponer de imágenes satelitales obtenidas de la página web *EarthExplorer USGS* (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) y a su vez, la información básica meteorológica, fue recopilada del Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana de Venezuela el cual se encuentra ubicado en el estado Aragua.

Descripción de la metodología

La investigación seguirá una metodología la cual permite dividir actividades por fases para convertir el problema en muchos más pequeños, logrando así una mejor percepción de cada aspecto de la investigación. Con la metodología empleada, es necesaria la ejecución de las siguientes fases de investigación:

- Fase de Recolección de Datos
- Fase de Procesamiento de Datos
- Fase de Obtención de Resultados

RECOLECCIÓN DE DATOS

Es necesario disponer de información base, la cual es necesaria para la elaboración de la investigación. Dicha información, fue recopilada de diferentes fuentes públicas. Las imágenes satelitales de la cuenca del Río Unare, se adquirieron de la página web *EarthExplorer USGS*. Por su parte, la información de estaciones meteorológicas fue recopilada del *Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana*, ubicada en el estado Aragua.

Imágenes Satelitales

A continuación, se describe el procedimiento para la obtención de las imágenes satelitales:

- Acceder a la dirección web: <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- Iniciar sesión (o crear un usuario en caso de no poseer cuenta).



Figura 4. Procedimiento para obtención de imágenes satelitales

- Aproximarse al área de estudio y hacer *clic* con el mouse en algún punto dentro de ella. Al hacer esto, aparecerán reflejadas las coordenadas de dicho punto.

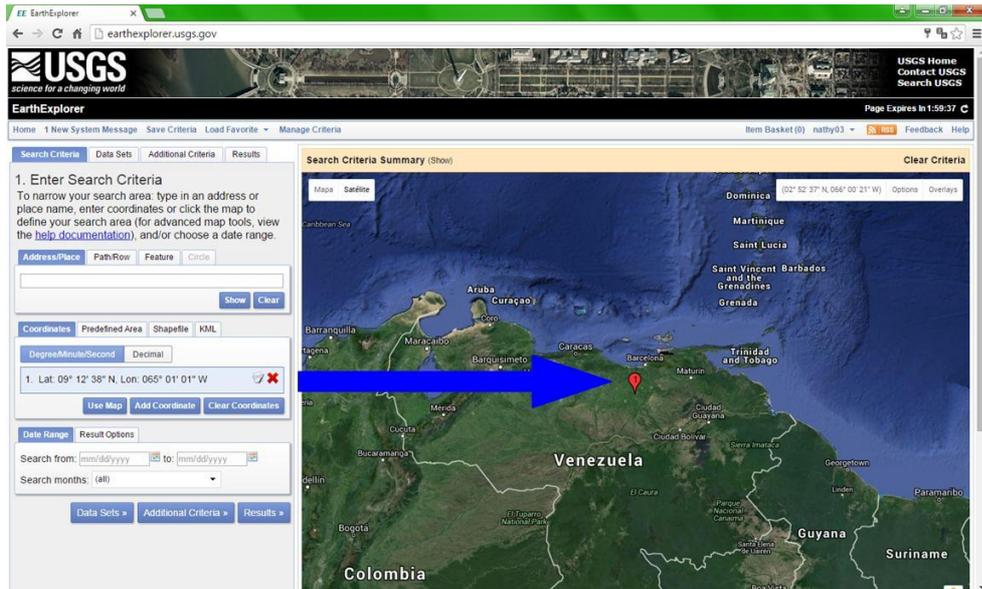


Figura 5. Procedimiento para obtención de imágenes satelitales

- Presionar la pestaña DATA SETS para seleccionar el satélite a partir del cual de obtendrán las imágenes. Luego, desplegar la pestaña LANDSAT ARCHIVE y seleccionar los siguientes satélites:
 - L7 + ETM (1999 – 2003)
 - L7 + ETM (2003 – PRESENT)
 - L8 OLI – TIRS

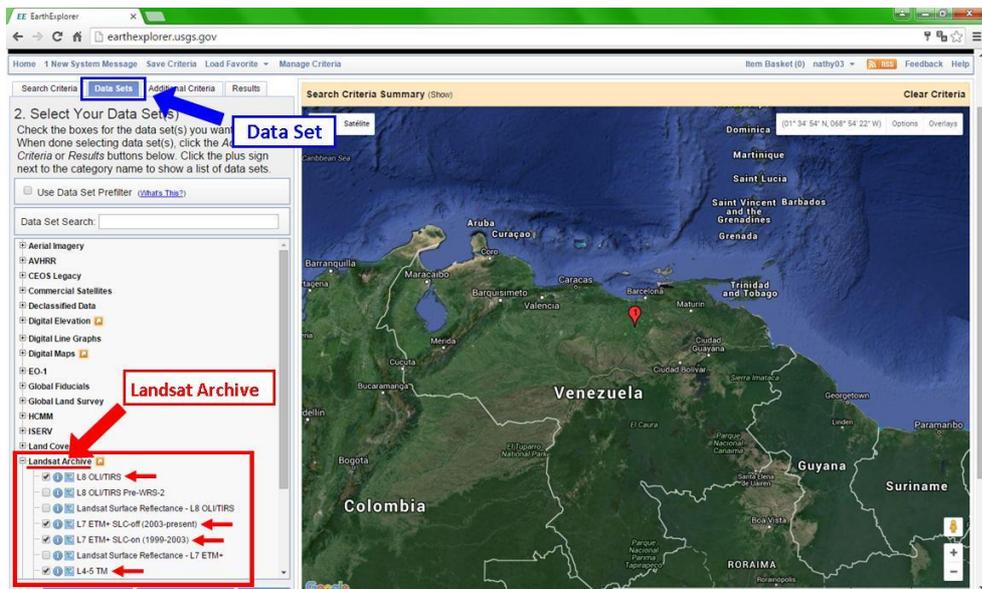


Figura 6. Procedimiento para obtención de imágenes satelitales

- Hacer *clic* en la pestaña RESULTS. Luego, seleccionar de la lista desplegable el satélite del que se desea observar los resultados.

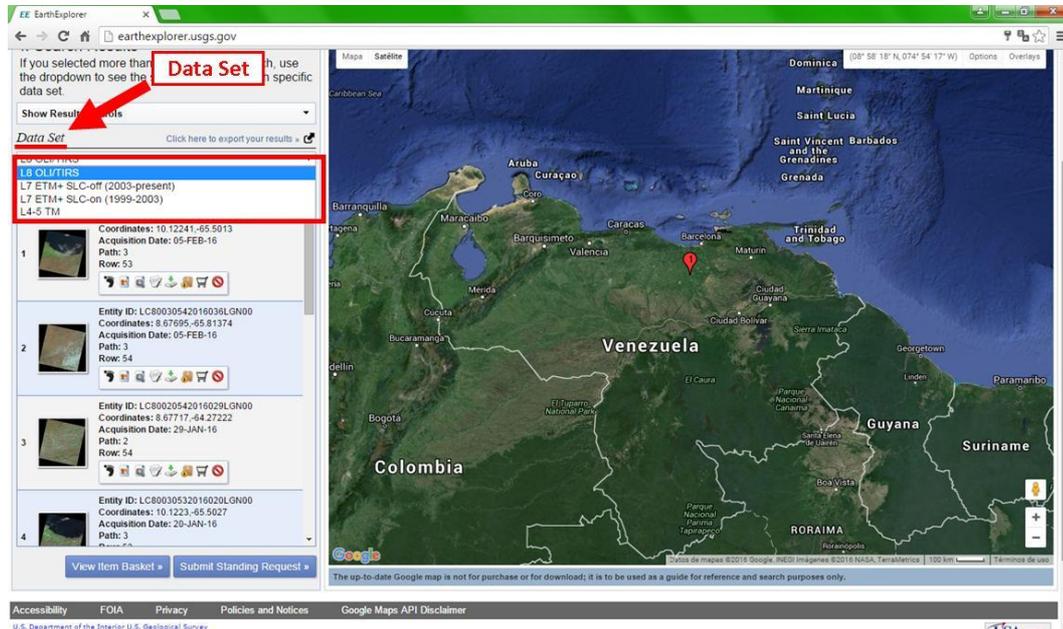


Figura 7. Procedimiento para obtención de imágenes satelitales

- Una vez ubicada cada imagen de interés, hacer *clic* sobre ella para obtener una vista previa de ella y sus características, verificando que tenga la menor presencia de nubes posible, ya que estas son capaces de generar distorsión en los resultados del estudio.

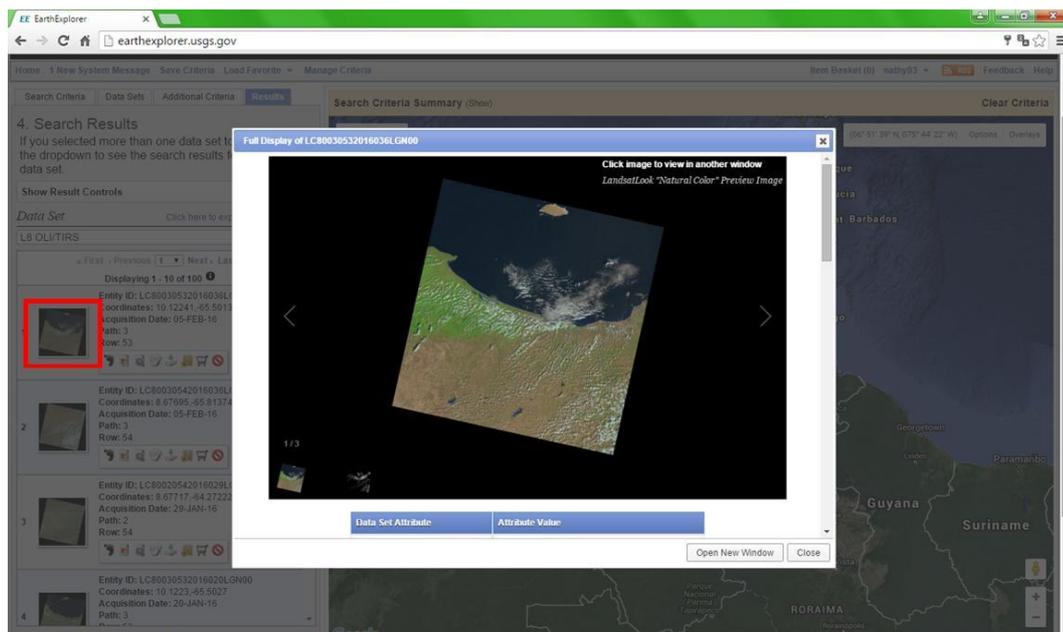


Figura 8. Procedimiento para obtención de imágenes satelitales

- Para descargar la imagen, hacer *clic* en el icono de descarga y seleccionar luego la opción LEVEL 1 PRODUCT.

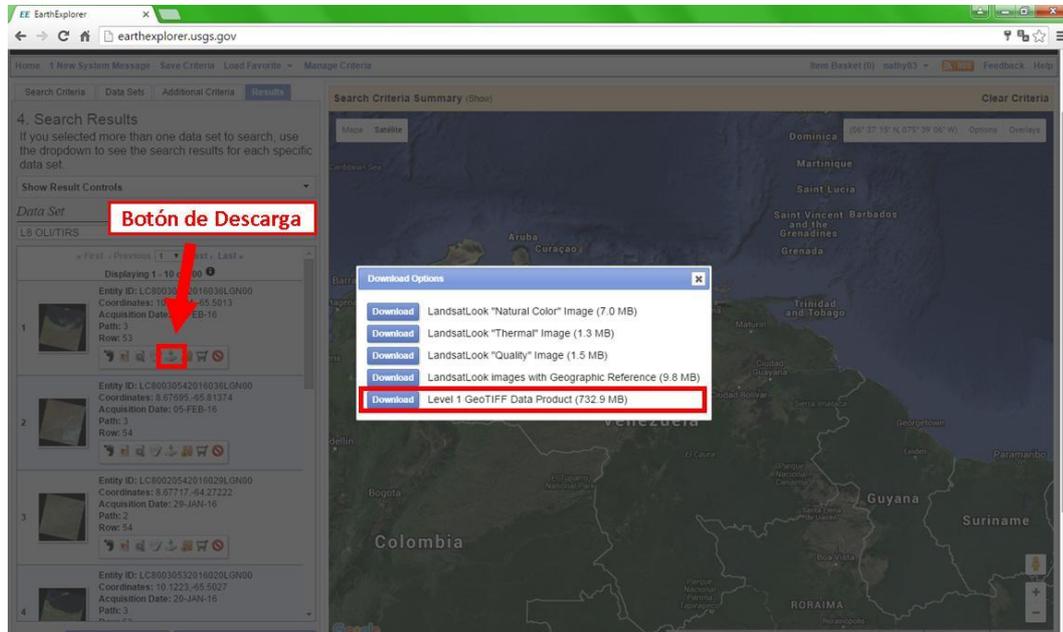


Figura 9. Procedimiento para obtención de imágenes satelitales

La cuenca del Río Unare abarca un total de 4 imágenes satelitales (ver Figura 9). Sin embargo, este trabajo de investigación se limita al procesamiento de dos de ellas (fila 3/trayectoria 53 y fila 3/trayectoria 54) debido a que fue posible obtenerlas en fechas iguales o similares para diferentes años, así como también de muy buena calidad. Las imágenes fila 2/trayectoria 53 y fila 2/trayectoria 54, presentaban alto porcentaje de nubes y contaminación propia de los satélites, motivo por el cual fueron descartadas, debido a que esto acarrearía resultados no confiables. El conjunto de imágenes a procesar se observa en la Tabla 5

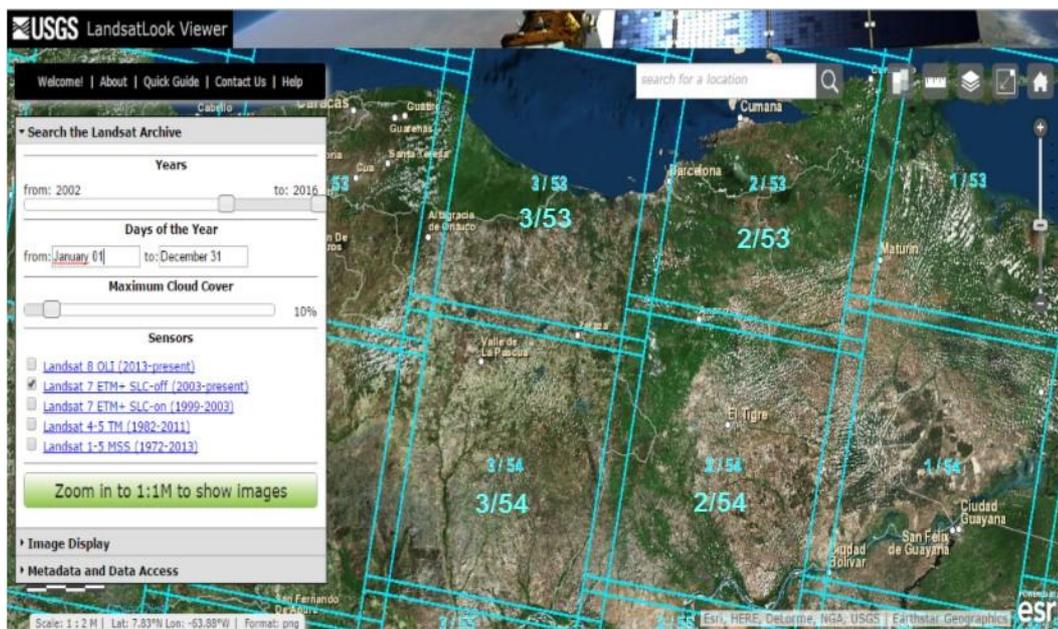


Figura 10. Fila y Trayectoria de la Cuenca del Río Unare

Fuente: LandsatLook Viewer (Fuente: <http://landsatlook.usgs.gov/viewer.html>)

Tabla 5.

Información de Imágenes Satelitales de la Cuenca del Río Unare, ubicada entre los estados Guárico - Anzoátegui.

CÓDIGO DE IMAGEN	FILA	COLUMNA	FECHA DE CAPTURA	SATÉLITE	COBERTURA DE NUBES (%)
LE70030532016028EDC00	3	53	28/01/2016	L7 ETM+SLC-off (2003-presente)	2,00
LE70030542016028EDC00	3	54	28/01/2016	L7 ETM+SLC-off (2003-presente)	3,00
LC80030532015129LGN00	3	53	09/05/2015	L8 OLI/TIRS	1,76
LC80030542015129LGN00	3	54	09/05/2015	L8 OLI/TIRS	2,77
LC80030532014206LGN00	3	53	25/07/2014	L8 OLI/TIRS	3,55
LC80030542014206LGN00	3	54	25/07/2014	L8 OLI/TIRS	4,75
LE70030532013131EDC00	3	53	11/05/2013	L7 ETM+SLC-off (2003-presente)	4,00
LE70030542013131EDC00	3	54	11/05/2013	L7 ETM+SLC-off (2003-presente)	3,00
LE70030532003056EDC00	3	53	25/02/2003	L7 ETM+SLC-on (1999-2003)	2,00
LE70030542003056EDC00	3	54	25/02/2003	L7 ETM+SLC-on (1999-2003)	2,00
LE70030532001066PFS00	3	53	07/03/2001	L7 ETM+SLC-on (1999-2003)	4,00
LE70030542001066PFS00	3	54	07/03/2001	L7 ETM+SLC-on (1999-2003)	0,00

Estaciones Meteorológicas

La información de las variables meteorológicas necesarias para la investigación, fue suministrada por el Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana de Venezuela (ver Anexo 1). Los datos fueron solicitados con fechas específicas las cuales coinciden con las fechas de las imágenes satelitales con las que son necesarias realizar el estudio. Se solicitaron datos de las variables Precipitación, Humedad, Temperatura, Velocidad del Viento, Evaporación y Radiación.

Tabla 6.

Estaciones meteorológicas del Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana de Venezuela para el uso de la Cuenca del Río Unare, Estados Guárico-Anzoátegui

INDICATIVO OMM:	ESTACIÓN	LATITUD N	LONGITUD W	ELEVACIÓN msnm
80443	San Tome	8° 56' 47,34"	64° 8' 40,41"	201
80419	Barcelona	10° 6' 24,92"	64° 41' 8,55"	37
80431	San Juan	9° 54' 41,58"	67° 22' 34,26"	448
80434	Valle de la Pascua	9° 13' 8,23"	65° 59' 56,47"	196



Figura 11. Ubicación de Estaciones Meteorológicas adscritas al Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana de Venezuela

El Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana proporcionó la información de las variables solicitadas, correspondientes a las estaciones meteorológicas ubicadas en las ciudades de Barcelona, San Tome, Valle de la Pascua y San Juan. Sin embargo, debido a la falta de información meteorológica de precipitación, se recabó dicha información a través de la página web del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH) de las siguientes estaciones:

Tabla 7.

Estaciones meteorológicas descargadas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de la Cuenca del Río Unare, Estados Guárico-Anzoátegui

SERIAL	ESTACIÓN	ESTADO	LATITUD	LONGITUD	PERIODO
AN02608AP1	CLARINES	AN	9,956667	-65,164722	
AN07311AP1	ONOTO	AN	9,604700	-65,509700	
AN07312AP2	SAN RAFAEL DE LAYA	AN	9,574722	-65,636667	
AN03715AA6	EL TIGRE-CIA	AN	8,883329	-64,250000	
AN001	EL_CHAPARRO_PRUEBA	AN	9,150833	-65,009167	
GU0001	MATA_LINDA_SOCORRO_PRUEBA	GU	8,913889	-65,650000	
AN02620AP1	MAPIRE	AN	7,736311	-64,718164	
AN04712AC1	MUSINACIO	AN	7,706080	-64,742850	
AN01790AC1	LA CORCOVADA	AN	10,093611	-64,564444	
AN02722AP1	EL CARITO	AN	9,787283	-64,738934	2013-2016
AN01755AP1	ARAGUA DE BARCELONA	AN	9,462800	-64,812800	
AN01751AP1	PUERTO LA CRUZ	AN	10,217400	-64,627200	
AN01796AP1	BERGANTIN	AN	10,014500	-64,364700	
AN02725AP1	SAN MATEO	AN	9,736411	-64,559505	
AN03718AP1	EL MANGUITO	AN	8,670933	-64,875969	
GU03400AA1	BIOLOGICA LOS LLANOS	GU	8,851169	-67,386000	
GU02417AS3	SAN JUAN DE LOS MORROS	GU	9,920000	-67,380000	
GU07242AP1	LA YEGUERA	GU	9,279770	-67,382480	
GU02448AP1	ORTIZ	GU	9,612030	-67,286530	

Tabla 8.

(Cont.) Estaciones meteorológicas descargadas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de la Cuenca del Río Unare, Estados Guárico-Anzoátegui

SERIAL	ESTACION	ESTADO	LATITUD	LONGITUD	PERÍODO
1790	LA CORCOVADA	AN	10,0500	-64,3400	
1680	BOCA DE UCHIRE	AN	10,0848	-65,2540	
2647	GUARIBE-TENEPE	AN	9,4541	-65,2908	
2761	GUAYABAL	AN	9,2605	-64,4315	
3715	EL TIGRE-CIA-GUANIPA	AN	8,5200	-64,1300	
3840	SAN MIGUEL	AN	8,3714	-63,2156	
3712	PARIAGUAN	AN	8,5043	-64,4259	
2757	ANACO	AN	9,29	-64,29	2001-2003
2608	CLARINES	AN	9,575	-65,095	
2425	LEZAMA	GU	9,4346	-66,2304	
2513	PRESA TAMANACO	GU	9,2702	-66,035	
2589	VALLE DE LA PASCUA	GU	9,13	-66	
2505	GUATOPO	GU	10,0308	-66,26	
3625	SANTA MARIA DE IPIRE	GU	8,503	-65,195	
3417	EL CABALLO	GU	8,19	-67,08	

PROCESAMIENTO DE DATOS

Esta fase comprende la explicación de manera detallada del procedimiento necesario para la aplicación del modelo SEBAL y el balance hídrico mediante el uso del Software ArcGIS 10.0 para la estimación de la producción hídrica en la cuenca del Río Unare, ubicada entre los es.

A continuación, se muestran los diagramas y se describen los procedimientos seguidos para la estimación de las variables físicas propias de la cuenca del Río Unare, mediante la aplicación del modelo SEBAL, en función de los años y a través del uso de imágenes satelitales, cuya estimación es necesaria para la obtención de las variables que directamente conforman la Ecuación de la evapotranspiración y, en consecuencia, de la estimación del balance hídrico de dicha cuenca.

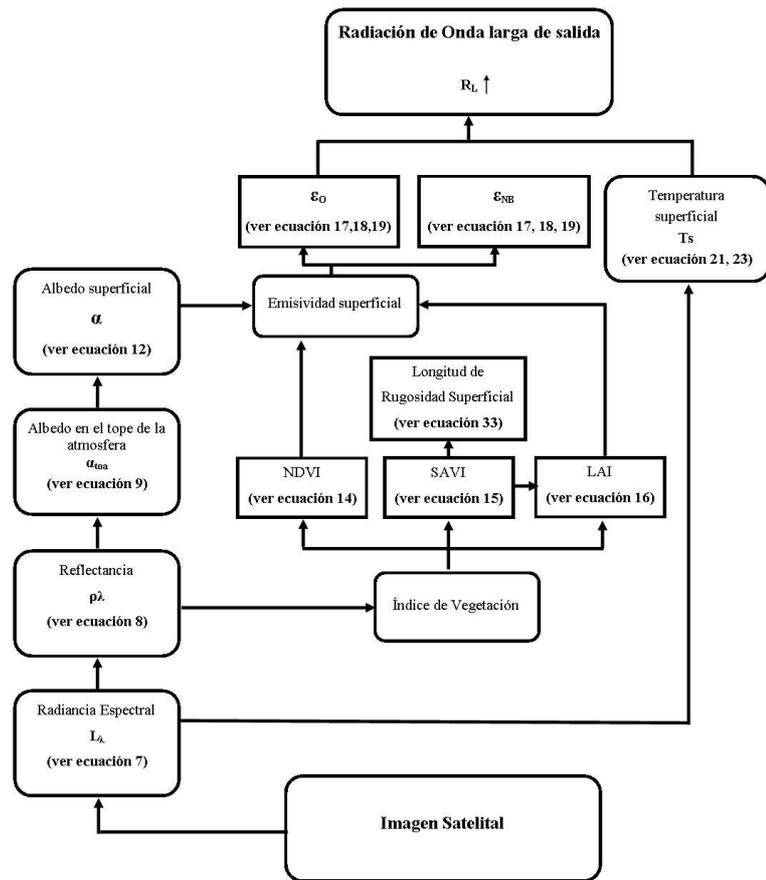


Figura12. Diagrama correspondiente al proceso de cálculo de algunas variables físicas, mediante la aplicación del modelo SEBAL

El Diagrama que se muestra en la Figura 12, muestra el proceso mediante el cual se calculan los parámetros necesarios para la posterior estimación de los componentes de la Ecuación de evapotranspiración, mediante la aplicación del modelo SEBAL. La primera fase de dicho proceso está representada por la transformación de los Números Digitales de la imagen satelital previamente apilada a un parámetro físico representado por la Radiancia Espectral, mediante la Ecuación (7). La segunda fase representa el cálculo realizado para la transformación de la Radiancia Espectral a valores Reflectancia, mediante la Ecuación (8). Luego, se calcula el albedo superficial el cual, en primera instancia, es estimado en el tope de la atmósfera (ver Ecuaciones 9 y 10) a partir de la Reflectancia de las bandas que conforman la imagen satelital. La corrección del albedo para referirlo a la superficie de la tierra, se realiza mediante la Transmisividad Atmosférica t_{sw} , la cual varía en

función de la altura de la estación meteorológica de la zona en estudio, mediante la Ecuación (12).

Un aspecto importante dentro de lo que se refiere al cálculo de la Reflectancia y el Albedo Superficial, es que para su estimación se requiere el valor de la Irradiancia Solar Exoatmosférica (ESUN) para cada banda de la imagen satelital analizada. Para el caso de las imágenes provenientes del Landsat 7, estos valores son constantes para cada banda de la imagen satelital, sin embargo, para el caso de las obtenidas a través del satélite Landsat 8, estos valores deben calcularse mediante la Ecuación (11). La Tabla 9 muestra los valores ESUN y de coeficientes ponderados para cada banda, en función de las imágenes satelitales analizadas en esta investigación, provenientes del satélite Landsat 8.

Tabla 9

Valores de ESUN y coeficientes ponderados para cada banda de imágenes satelitales provenientes del satélite Landsat 8.

FECHA	FILA/ TRAECTORIA	BANDA	ESUN W/(m ² *μm)	ΣESUN	ω _i
25/07/2014	3/53	2	2019,6838	6692,4711	0,3018
		3	1764,7408		0,2637
		4	1569,4024		0,2345
		5	960,3959		0,1435
		6	238,8417		0,0357
		7	80,5025		0,0120
		10	58,9041		0,0088
	3/54	2	2019,6838	6788,8518	0,2975
		3	1861,1213		0,2741
		4	1569,4024		0,2312
		5	960,3960		0,1415
		6	238,8418		0,0352
		7	80,5025		0,0119
		10	58,9041		0,0087
09/05/2015	3/53	2	2019,7349	6788,3015	0,2975
		3	1861,1684		0,2742
		4	1569,4421		0,2312
		5	960,4202		0,1415
		6	238,8478		0,0352
		7	80,5045		0,0119
		10	58,1837		0,0086
	3/54	2	2019,7346	6788,3008	0,2975
		3	1861,1682		0,2742
		4	1569,4419		0,2312
		5	960,4202		0,1415
		6	238,8477		0,0352
		7	80,5045		0,0119
		10	58,1837		0,0086

Por su parte, los índices de vegetación, se calculan a partir de la Reflectancia de las bandas 3 y 4 de la imagen satelital, obteniendo como resultado el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI), el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) y el índice de Área Foliar (LAI), de acuerdo con las

Ecuaciones (14, 15 y 16), respectivamente. Luego, se computa el modelo correspondiente a la Emisividad Superficial, estructurado según las Ecuaciones (17, 18 y 19). Seguidamente, se ejecuta el modelo referente a la temperatura superficial, a partir de la Radiancia de la banda 6 de la imagen satelital y de la Emisividad Superficial (ver Ecuación 21).

Seguidamente, se estima la Longitud de Rugosidad Superficial, a partir del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) (ver Ecuación 32). Finalmente, esta temperatura y Emisividad superficiales, sirven de base para el cálculo de la radiación de onda larga de salida, según lo expresado en la Ecuación (26). El uso de estos parámetros calculados dentro del cálculo de la Evapotranspiración, se explica en los diagramas siguientes.

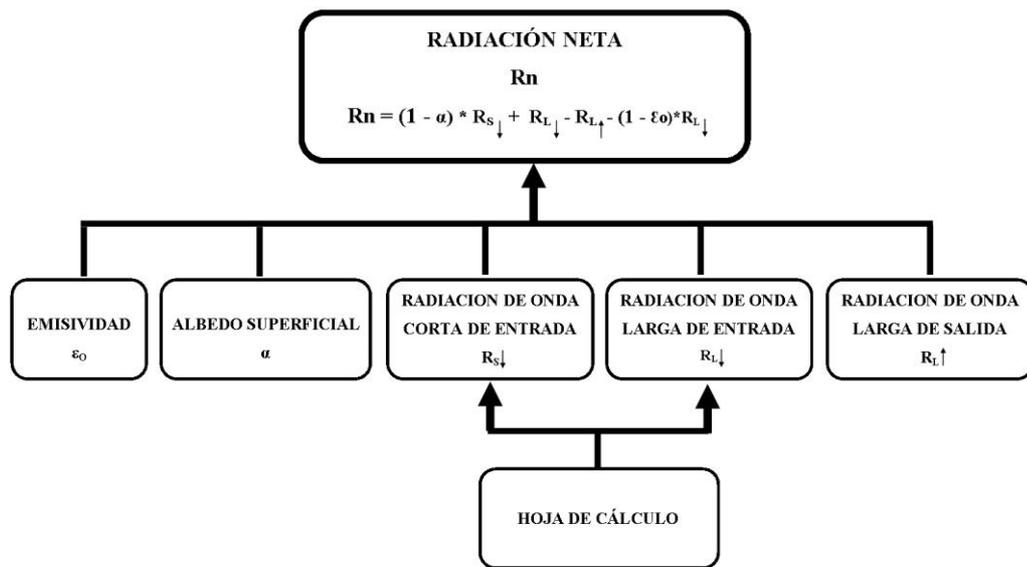


Figura 13. Diagrama correspondiente al proceso de cálculo de la Radiación Neta mediante la aplicación del modelo SEBAL

La Radiación Neta R_n representa una de las variables que conforman la Ecuación para la estimación de la Evapotranspiración, mediante la Ecuación (6). El diagrama de la Figura 13 muestra las etapas necesarias para el cálculo de esta variable, mediante la aplicación del modelo SEBAL, de acuerdo con la Ecuación

(30). Su estimación está basada en la diferencia entre las ganancias y las pérdidas, mediante la Ecuación de radiación en la superficie, referida anteriormente.

Previo al cálculo de la Radiación Neta, se debe realizar la selección de píxeles “ancla” para cada imagen satelital. El procedimiento detallado se indica en el Anexo 5. La Tabla 10 y 11 muestra los píxeles “ancla” escogidos para cada una de las imágenes satelitales en estudio, que conforman la cuenca del Río Unare, ubicado entre los estados Guárico y Anzoátegui de la República Bolivariana de Venezuela.

El albedo superficial α , la Emisividad superficial ϵ_0 y la Radiación de Onda Larga de Salida $R_{L\uparrow}$, son tres de los cinco parámetros base necesarios para el cálculo de la Radiación Neta R_n , los cuales son computados previamente mediante el modelo SEBAL, de acuerdo con el procedimiento que se muestra en la Figura 13. Por su parte, la Radiación de Onda Corta de entrada $R_{S\downarrow}$ y la Radiación de onda Larga de entrada $R_{L\downarrow}$, son valores constantes en la Ecuación principal, previamente deducidos mediante hoja de cálculo (ver Anexo 6), con base en información de la estación meteorológica de la zona, del archivo de metadatos de cada imagen satelital y de la temperatura del píxel frío (ver Anexos 4 y 6).

El procedimiento seguido dentro del modelo SEBAL, para el cálculo de la Radiación Neta R_n , se describe más específicamente en el Anexo 5.

Tabla 10

Coordenadas y atributos de los píxeles “ancla” para imágenes satelitales que conforman la cuenca del Río Unare, ubicada entre los estados Guárico y Anzoátegui en la República Bolivariana de Venezuela, provenientes del satélite Landsat 7.

	FECHA	(FILA,COLUMNA)	TIPO	COORDENADAS (UTM)			NDVI	ALBEDO	LAI	T(K)	Rn	Z _{0m} SAVI
				HUSO	X	Y						
LANDSAT 7	7 DE MARZO DE 2001	(3,53)	P. CALIENTE	19N	829159	1064407	0,1582	0,2454	0,0797	311,7279	501,0952	0,0066
			P. FRÍO	19N	828849	1063633	0,7447	0,1887	3,9339	300,9100	615,8243	0,1322
		(3,54)	P. CALIENTE	19N	793810	1058463	0,1927	0,2822	0,1520	311,7499	469,8199	0,0081
			P. FRÍO	19N	789070	1061208	0,5641	0,0211	1,2881	305,2811	571,6188	0,0516
	25 DE FEBRERO DE 2003	(3,53)	P. CALIENTE	20N	208073	1095930	0,1924	0,1996	0,1270	310,3517	512,2921	0,0076
			P. FRÍO	19N	822839	1043724	0,6654	0,2026	2,0433	301,9000	570,4044	0,0865
		(3,54)	P. CALIENTE	19N	822155	1042974	0,1986	0,2635	0,0154	308,9259	467,3952	0,0081
	27 DE JULIO DE 2012	(3,53)	P. FRÍO	19N	802120	1036276	0,7132	0,2779	4,1455	300,9147	523,5392	0,0087
			P. CALIENTE	20N	217152	1093743	0,2994	0,2137	0,3498	302,5486	561,3783	0,0130
		(3,54)	P. FRÍO	20N	217413	1094172	0,7496	0,1817	4,3760	298,3858	613,8239	0,1363
			P. CALIENTE	19N	822467	1042927	0,3843	0,1615	0,5223	299,9891	596,5330	0,0185
	11 DE MAYO DE 2013	(3,53)	P. FRÍO	20N	239922	1061055	0,7100	0,2828	3,9997	296,1618	516,9332	0,1329
			P. CALIENTE	19N	829159	1064407	0,1864	0,2329	0,1275	307,0166	551,9522	0,0076
		(3,54)	P. FRÍO	20N	172803	1066837	0,7504	0,1852	4,0842	300,9147	628,7956	0,1374
	28 DE ENERO DE 2016	(3,53)	P. CALIENTE	19N	824250	1044111	0,2420	0,2540	0,2428	308,9036	516,5471	0,0100
			P. FRÍO	19N	822552	1043331	0,7522	0,1845	4,3776	300,9147	625,0310	0,1363
(3,54)		P. CALIENTE	20N	235709	1098224	0,1546	0,2888	0,0803	311,0775	394,8331	0,0066	
		P. FRÍO	20N	252565	1099126	0,7936	0,1358	4,7537	298,3858	598,4426	0,1388	
(3,54)	P. CALIENTE	20N	205556	1025640	0,1916	0,2581	0,1425	307,0129	461,7753	0,0079		
	P. FRÍO	19N	824940	1036973	0,5644	0,1578	1,1247	299,3384	589,7022	0,0441		

Tabla 11

Coordenadas y atributos de los píxeles “ancla” para imágenes satelitales que conforman la cuenca del Río Unare, ubicada entre los estados Guárico y Anzoátegui en la República Bolivariana de Venezuela, provenientes del satélite Landsat 8.

	FECHA	(FILA,FILA)	TIPO	COORDENADAS (UTM)			NDVI	ALBEDO	LAI	T(K)	Rn	Z _{0m savi}
				HUSO	X	Y						
LANDSAT 8	25 DE JULIO DE 2014	(3,53)	P. CALIENTE	20N	228687	1094090	0,2830	0,2852	0,3453	302,3165	453,3664	0,0129
			P. FRÍO	20N	227011	1095014	0,8010	0,2336	6,0000	296,6060	467,5913	0,2044
		(3,54)	P. CALIENTE	20N	259783	1037637	0,4241	0,2049	0,6655	304,0996	563,6491	0,0237
			P. FRÍO	20N	260285	1026085	0,7871	0,1775	6,0000	297,5400	620,1713	0,1694
	09 DE MAYO DE 2015	(3,53)	P. CALIENTE	20N	252250	1067477	0,2367	0,2978	0,2432	314,0712	447,3203	0,0100
			P. FRÍO	20N	181886	1135763	0,7063	0,2211	2,9338	299,8495	603,8456	0,1158
		(3,54)	P. CALIENTE	20N	256272	1023349	0,2465	0,2921	0,2635	310,2774	502,0907	0,0107
			P. FRÍO	20N	290592	1025383	0,4971	0,2629	1,0226	305,9892	554,8028	0,0392

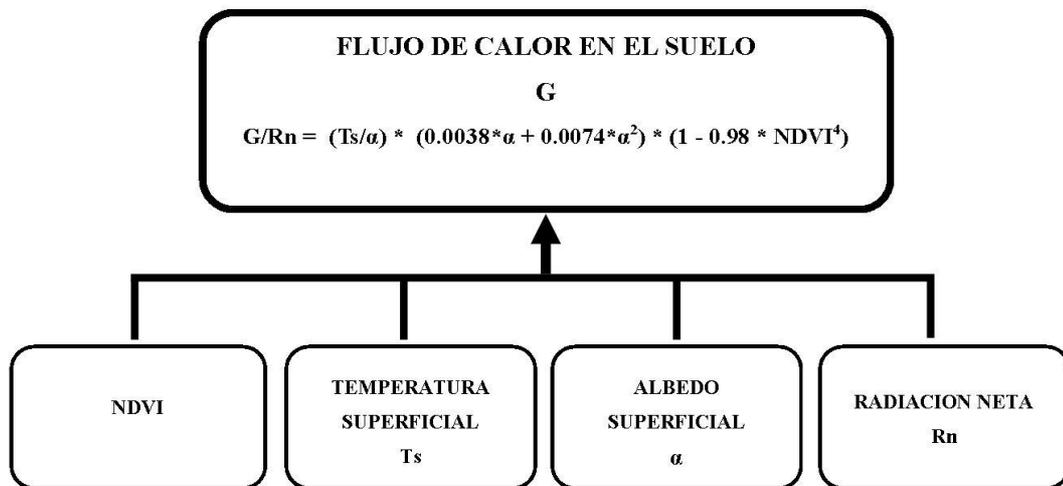


Figura 14. Diagrama correspondiente al proceso de cálculo del Flujo de Calor en el Suelo (G) mediante la aplicación del modelo SEBAL.

El diagrama de la Figura 14, muestra los parámetros necesarios para el cálculo del Flujo de Calor en el Suelo G , de acuerdo con la Ecuación (31), basada en una relación empírica que relaciona dicho parámetro con la Radiación neta, propuesta por Bastiaanssen (1998). Este parámetro representa otro de los principales que conforman la Ecuación para la estimación de la Evapotranspiración (ver Ecuación 6), ya que este representa el flujo de calor almacenado en el suelo y la vegetación debido al proceso de conducción.

Para la estimación de esta variable mediante la aplicación del modelo SEBAL, es necesario contar con la información referente a los modelos antes calculados de Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI), Temperatura Superficial, Albedo Superficial y Radiación Neta. El procedimiento detallado concerniente a cada uno de los pasos seguidos para el cálculo del Flujo de Calor en el Suelo G , se muestra en el Anexo 5.

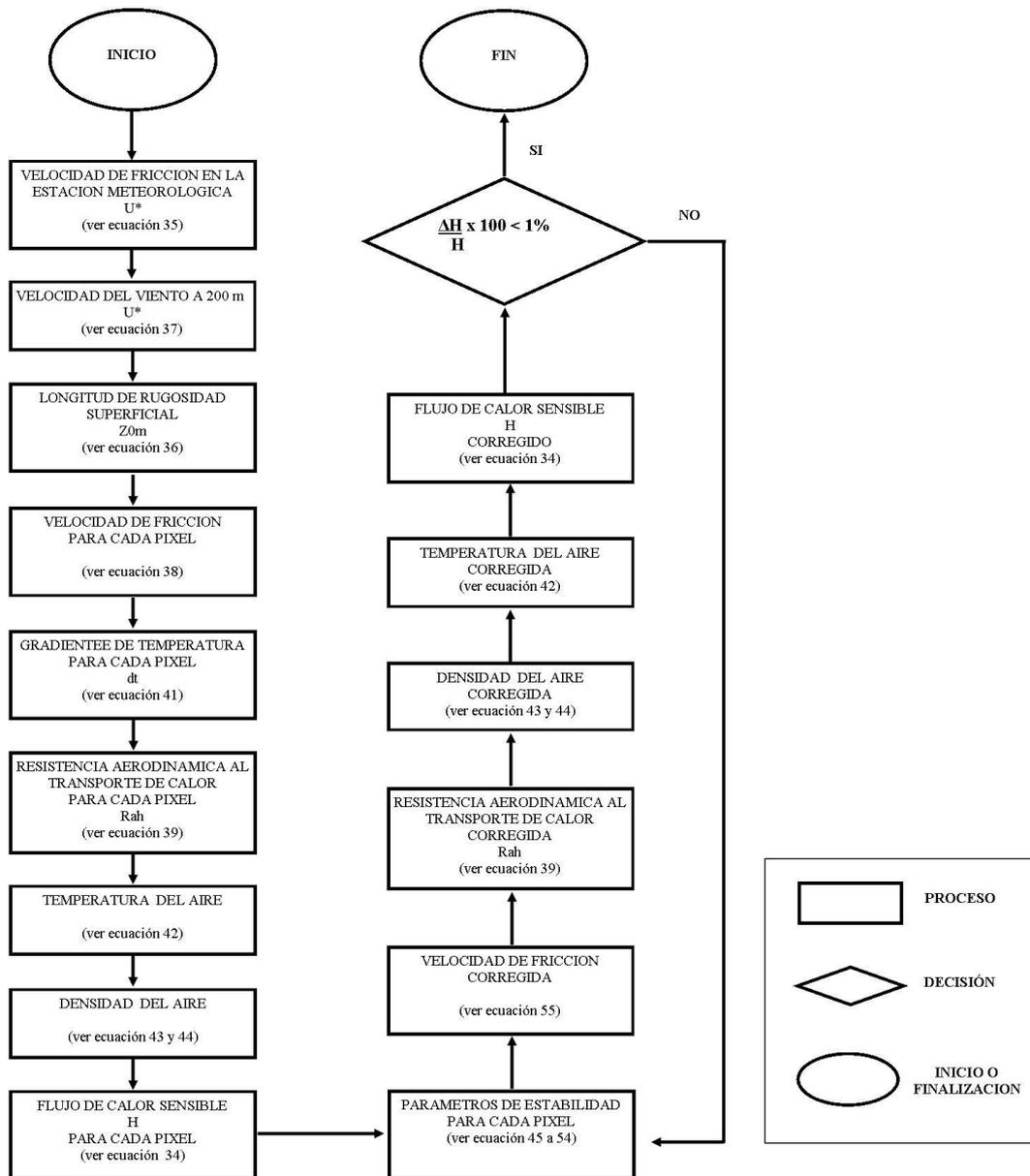


Figura 15. Diagrama de flujo correspondiente al cálculo del Flujo de Calor Sensible (H) para el modelo SEBAL.

El diagrama de la Figura 15, muestra gráficamente el proceso de cálculo del Flujo de Calor Sensible H , el cual representa la tercera variable que conforma la Ecuación para la estimación de la Evapotranspiración (ver Ecuación 6), mediante la aplicación del modelo SEBAL y el uso de hoja de cálculo (ver Anexo 5 y 6). La estimación de esta variable presenta mayor nivel de dificultad de cálculo debido a

que se hace necesaria la ejecución de una serie de iteraciones, con el fin de estimar un valor de la Resistencia Aerodinámica al Transporte de Calor r_{ah} que considerara los impactos de la inestabilidad atmosférica, hasta que su variación con respecto al valor anterior sea aproximadamente cero; también, se debe calcular un valor de la densidad del aire adaptada a dichas condiciones.

La primera iteración se lleva a cabo en dos etapas; la primera de ellas ingresando como único archivo de entrada el correspondiente a la Rugosidad de la Superficie e ingresando en la calculadora ráster el valor de la velocidad del viento a una altura sobre la estación meteorológica (200 metros). La segunda etapa de la primera iteración se basa en el cálculo del gradiente de temperatura, la temperatura del aire, la densidad del aire y el Flujo de Calor Sensible H , de acuerdo con las Ecuaciones (41, 42, 43, 44 y 34), respectivamente.

El resto de las iteraciones se llevan a cabo también en dos etapas, siguiendo un procedimiento diferente. Este consiste en el ingreso como archivos de entrada de la Temperatura Superficial, así como también de la densidad del aire, la velocidad de fricción y el Flujo de Calor Sensible H , provenientes de la ejecución de la iteración anterior. El primer cálculo realizado dentro del modelo que le corresponde, está representado por la Longitud de Monin-Obukhov (ver Ecuación 45), con base en la cual se computan las Correcciones de Estabilidad Momentánea Ψ_m y Ψ_h a 0.1, 2 y 200 metros (ver Ecuaciones 46 a 54). Finalmente, se debe adicionar un archivo de entrada correspondiente a la Rugosidad de la Superficie, el cual, junto con las correcciones de estabilidad antes calculadas, sirven de base para el cálculo de la velocidad de fricción y la Resistencia Aerodinámica al Transporte de Calor r_{ah} , basadas en las Ecuaciones (38 y 55), respectivamente.

La segunda etapa de este procedimiento se desarrolla de la misma manera que para la primera iteración, es decir, se calcula el gradiente de temperatura dt , la temperatura del aire t_a , la densidad del aire ρ , y el Flujo de Calor Sensible H , de acuerdo con las Ecuaciones (41, 42, 43, 44 y 34), respectivamente, para cada una de las iteraciones.

Para el cálculo de las variables que conforman el proceso iterativo, es necesario el cálculo previo de ciertos parámetros a través de la hoja de cálculo (ver Anexo 6). Las iteraciones se llevan a cabo hasta observar, mediante la antes referida hoja de cálculo, que la variación de r_{ah} o H , con respecto a su valor anterior, sea aproximadamente cero. El procedimiento detallado para cálculo del Flujo de Calor Sensible H dentro del modelo SEBAL, se especifica en el Anexo 5.

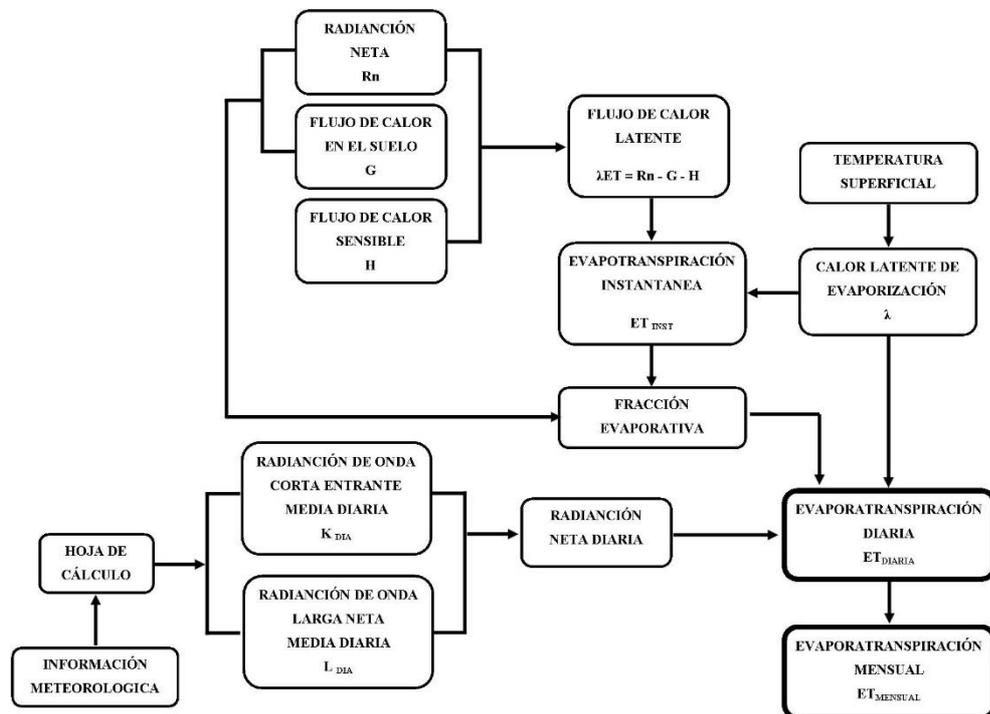


Figura16 Diagrama correspondiente al cálculo del Evapotranspiración mediante la aplicación del modelo SEBAL

Una vez obtenidas la Radiación Neta Rn , el Flujo de Calor en el Suelo G y el Flujo de Calor Sensible H , se calcula el Flujo de Calor Latente λET , mediante la Ecuación (6). Luego, se debe estimar el Calor Latente de Vaporización λ (ver Ecuación 57), con base en el cual se calcula la Evapotranspiración Instantánea ET_{INST} , la cual está en función de esta variable y del Flujo de Calor Latente λET (ver Ecuación 58). Seguidamente, se ejecuta el modelo referente a la Fracción

Evaporativa, el cual se basa en la Radiación Neta R_n , el Flujo de Calor en el Suelo G y la Evapotranspiración Instantánea E_{TINST} , tal como lo indica la Ecuación (59).

Otro de los parámetros que es necesario calcular, el cual también forma parte del SEBAL, es la Radiación Neta Diaria (ver Ecuación 61), basada en la variable Albedo Superficial y valores constantes de Radiación de Onda Corta media Diaria K_{dia} y de Radiación de Onda Larga Neta media Diaria L_{dia} , estos últimos obtenidos a partir de hoja de cálculo a partir del ingreso de datos meteorológicos (horas de sol, Humedad Relativa media y Temperatura media), correspondientes a la fecha en que fue tomada la imagen satelital en estudio.

Posteriormente, se debe calcular la Evapotranspiración diaria a partir de la Fracción Evaporativa, el Calor Latente de Vaporización λ y la Radiación Neta Diaria, según la Ecuación (60), para seguidamente ejecutar el cálculo de la Evapotranspiración mensual, la cual no es más que el producto de la Evapotranspiración Diaria por un número promedio de días del mes, en este caso, 30 días.

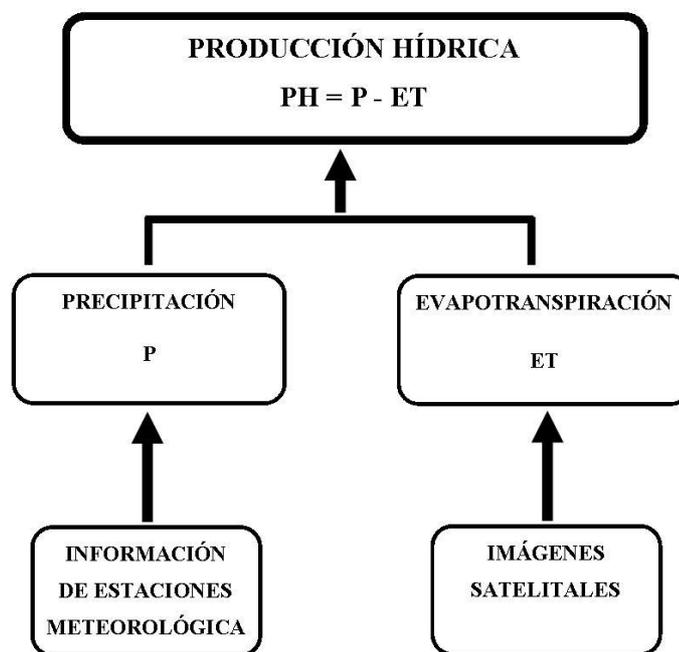


Figura 17. Diagrama correspondiente al cálculo de la Producción Hídrica

Para la estructuración de la información de precipitación para la cuenca en estudio, se hace necesaria la elaboración de hietogramas para determinar la precipitación mensual de las estaciones del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. La información de precipitación se encuentra inicialmente disponible en rangos horarios y es debido a esto que se debe calcular un acumulado para representar la información en rangos diarios. Una vez obtenidos los datos de precipitación por día, se grafica en el eje horizontal la información de los días y en el eje vertical la precipitación de cada día, logrando así estructurar el hietograma, presentando la precipitación por día en todo el mes de estudio para cada estación meteorológica.

Una vez obtenidos los valores de precipitación mensual, para cada estación meteorológica y cada año, se procede, mediante el uso del software Arcgis – ArcMap, a la ubicación espacial de los puntos que representan la ubicación de cada estación meteorológica, de manera tal que cada uno de esos puntos contenga información acerca de la precipitación que le corresponda, esto mediante la herramienta *Shapefile* del software en uso. Luego, se procede a crear un ráster con el fin de interpolar el conjunto de valores puntuales y así extenderlos a toda la superficie de la cuenca. Este procedimiento se aplica a cada conjunto de valores de precipitación, los cuales se agrupan por año, correspondientes a las imágenes satelitales en estudio.

Finalmente, se crea un modelo cuyos archivos de entrada son el ráster de precipitación y el ráster de Evapotranspiración mensual, a partir de los cuales se calcula la producción hídrica de la cuenca del Río Unare, mediante la Ecuación (2) para cada año en estudio.

RESULTADOS OBTENIDOS

En esta última etapa se muestran los resultados obtenidos de la modelación y se logran cubrir los objetivos planteados, con la finalidad de estimar la producción hídrica de la cuenca del Río Unare.

Tabla 12

Resultados obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales correspondientes a la cuenca del Río Unare, ubicada entre los estados Guárico y Anzoátegui, mediante la aplicación del modelo SEBAL y el software ArcGis- ArcMap 10.0.

OBJETIVO ESPECÍFICO	PRODUCTO OBTENIDO
<p>Describir las variables físicas de los modelos de estimación de la producción hídrica de la cuenca del Río Unare mediante el análisis de imágenes satelitales.</p>	Radiancia Espectral
	Reflectancia
	Albedo en el tope de la atmósfera
	Albedo Superficial
	Índices de Vegetación (NDVI, SAVI, LAI)
	Emisividad
	Temperatura Superficial
	Radiación de Onda Larga de Salida
	Radiación Neta
	Flujo de Calor en el Suelo
	Longitud de Rugosidad de Superficie
	Velocidad de Fricción
	Resistencia Aerodinámica al transporte de calor
	Flujo de Calor Sensible
	Evapotranspiración Instantánea
	Fracción Evaporativa
Radiación Neta Diaria	
Evapotranspiración Diaria	
Evapotranspiración Mensual	
Precipitación	
<p>Aplicar el modelo SEBAL para la estimación de la producción hídrica de la cuenca del Río Unare mediante el análisis de imágenes satelitales.</p>	<p>Mapas de Balance Hídrico en la cuenca del Río Unare</p>
<p>Analizar la variación espacial y temporal de la producción hídrica mediante el análisis de imágenes satelitales en la cuenca del Río Unare.</p>	<p>Análisis de la variación espacio temporal de la producción hídrica de la cuenca del Río Unare, mediante software estadístico.</p>

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la investigación de la estimación de la producción hídrica una vez aplicado el modelo SEBAL a cada una de las imágenes satelitales. El objeto es mostrar visualmente, mediante los diferentes mapas, la relación que existe entre los procesos que intervienen en la estimación de la producción hídrica de la cuenca del Río Unare, dando respuesta a los objetivos e interpretación de los resultados de la investigación.

Describir las variables físicas de los modelos de estimación de la producción hídrica de la cuenca del Río Unare mediante el análisis de imágenes satelitales

El balance de energía superficial contempla las variables físicas Radiación Neta R_n , Flujo de Calor en el Suelo G y Flujo de Calor Sensible H , para así obtener la evapotranspiración. Una vez estimada esta variable, se hace necesario relacionarla con la Precipitación, debido a que ambas representan la base de cálculo del balance hídrico. Las antes descritas, representan entonces, en forma general, las variables físicas que intervienen en la producción hídrica de la cuenca y, en el caso particular, la cuenca del Río Unare. A continuación, se describen detalladamente los resultados obtenidos del procesamiento de las imágenes satelitales correspondientes a la cuenca en estudio, para cada una de las variables mencionadas anteriormente:

Radiación Neta

La estimación de la radiación neta se realiza de acuerdo con la metodología SEBAL, basada en el intercambio neto entre el total de radiación de onda corta y de onda larga que se recibe y que se emite o refleja en una superficie, obteniéndose de esta manera la energía radiante real disponible en la superficie. En línea general, los resultados obtenidos para todos los años estudiados, se encuentran dentro de un rango de valores comprendidos entre 300 W/m^2 y 800 W/m^2 . La variabilidad se atribuye a que la radiación neta se ve afectada por la emisividad y el albedo de la superficie y estos a su vez por la cantidad de vegetación.

A continuación, se presentan los mapas de radiación neta generados mediante el uso del software ArcGis para cada fecha evaluada:

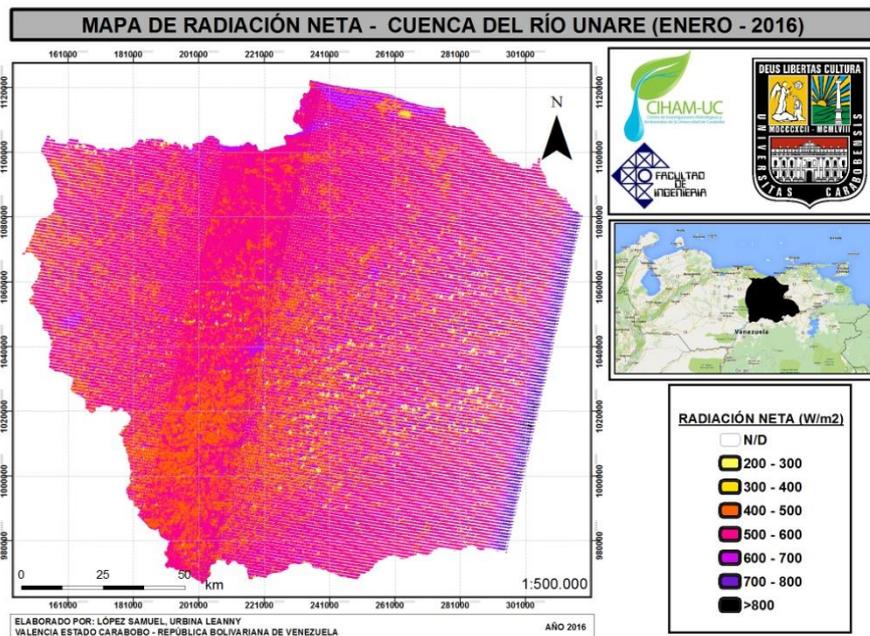


Figura 18. Mapa de Radiación Neta correspondiente al mes de enero de 2016

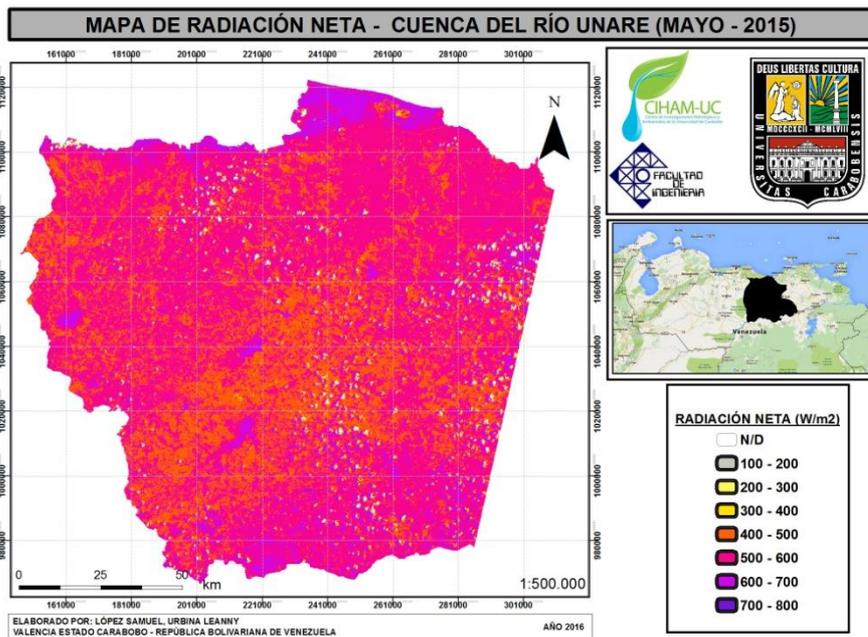


Figura 19. Mapa de Radiación Neta correspondiente al mes de mayo de 2015

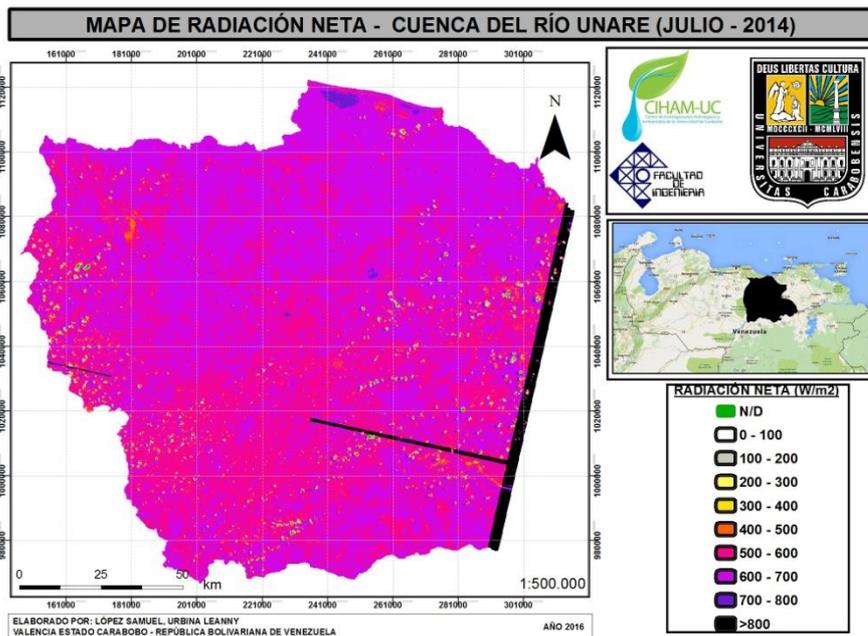


Figura 20. Mapa de Radiación Neta correspondiente al mes de julio de 2014

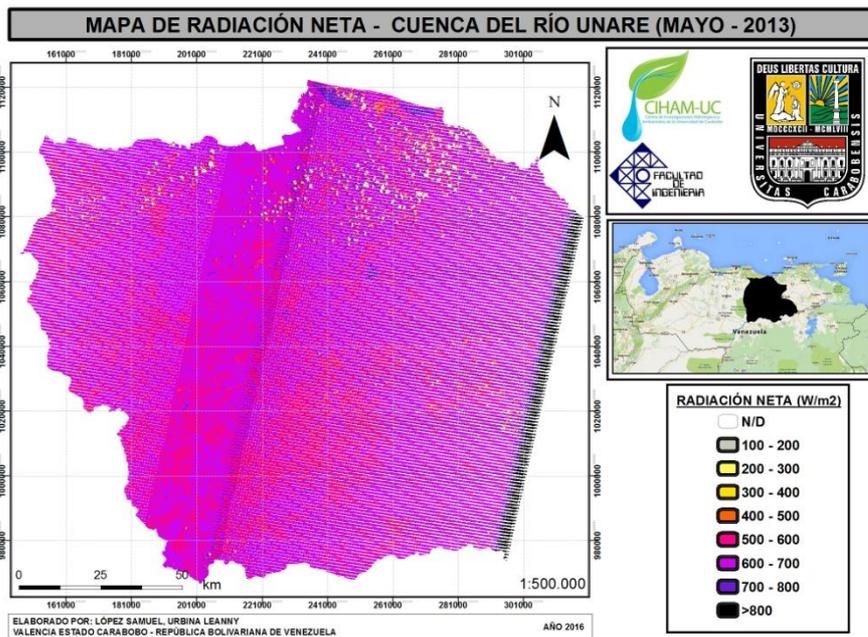


Figura 21. Mapa de Radiación Neta correspondiente al mes de mayo de 2013

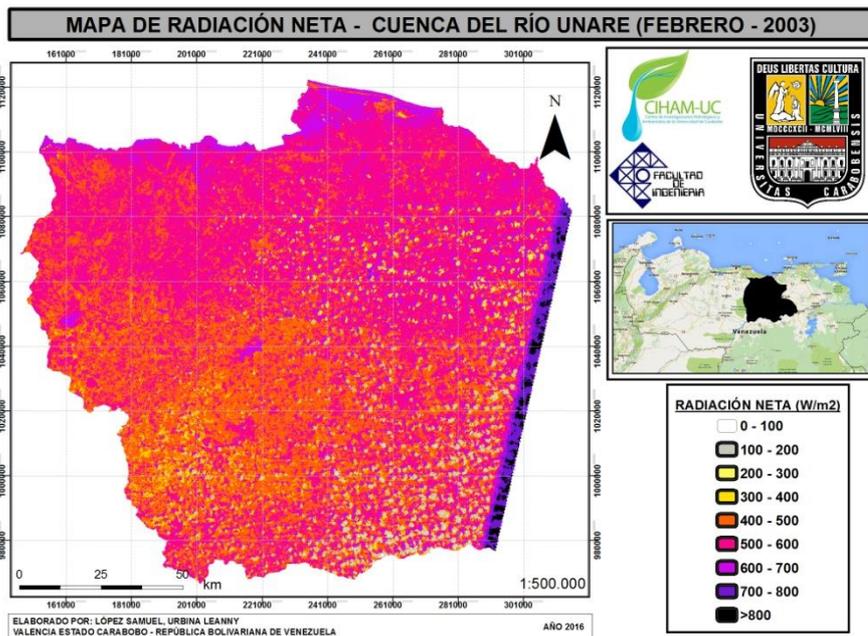


Figura 22. Mapa de Radiación Neta correspondiente al mes de febrero de 2003

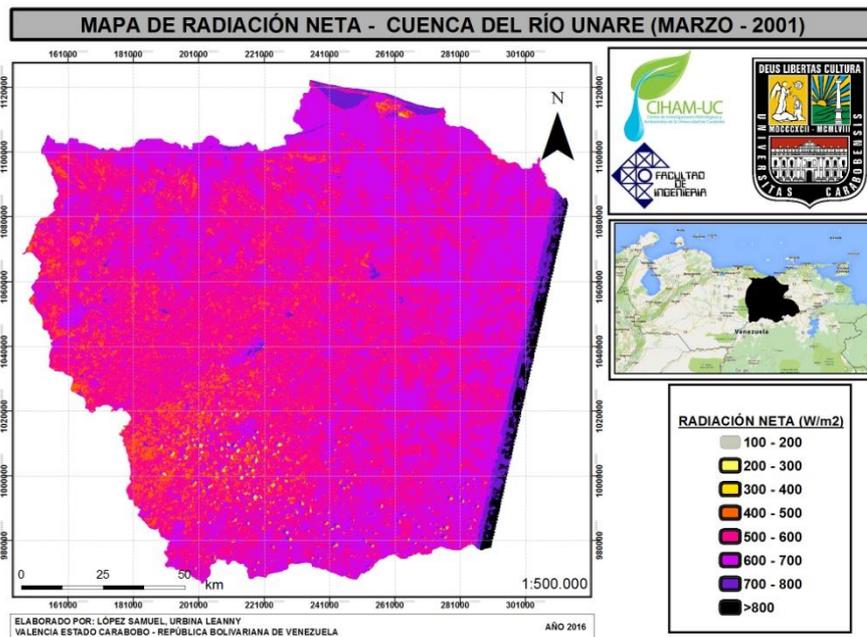


Figura 23. Mapa de Radiación Neta correspondiente al mes de marzo de 2001

Puede observarse que los valores que se encuentran por debajo del rango antes mencionado, se deben a la presencia de nubes, bien definidas en cada una de las imágenes satelitales, habiendo más presencia de ellas en la captura correspondiente al año 2016 con un 5% con respecto a toda la superficie de la cuenca del Río Unare. Por otra parte, los valores que se encuentran por encima del rango mencionado, se deben a defectos en la elaboración del mosaico la imagen satelital y no a un comportamiento propio de la cuenca en estudio.

Las imágenes satelitales corresponden a fechas que se encuentran entre las dos estaciones que se desarrollan en Venezuela, es decir, verano (años 2016, 2003 y 2001) e invierno (años 2015, 2014 y 2013). Las imágenes correspondientes a los años 2015, 2014 y 2013, las cuales representan la época de invierno o lluviosa, son las que cuyos mapas presentan mayor extensión de valores altos de Radiación Neta, predominando valores entre los W/m^2 600 y $800 W/m^2$. Por el contrario, la mayor extensión de valores bajos de la variable en estudio se presenta en los años de sequía, es decir, 2016, 2003 y 2001 con mayor concentración en la parte alta de la cuenca del Río Unare. Adicionalmente, se presenta un comportamiento a lo largo

de las imágenes analizadas, en cuan a las zonas donde se desarrollan los valores máximos y mínimos.

Los máximos valores de Radiación Neta se presentan en los cuerpos de agua, los cuales se extienden a lo largo de la superficie de la cuenca. Asimismo, los valores más bajos de esta variable se presentan en la parte alta de la cuenca del Río Unare, en la que predominan coberturas de suelo correspondientes a bosques y vegetación en general, seguidas por las zonas urbanas.

Flujo de Calor del Suelo

El flujo de calor del suelo representa la tasa de calor almacenada en el suelo y la vegetación debido a la conducción. Para realizar su estimación, se utiliza la Ecuación (26), donde los principales parámetros de entrada para la estimación son la Temperatura Superficial, el NDVI, el albedo superficial y la Radiación Neta. Con base en estos parámetros, se generan mapas de Flujo de Calor del Suelo G para cada una de las imágenes satelitales, teniendo en cuenta la relación G/R_n propuesta por Bastiaanssen (2000).

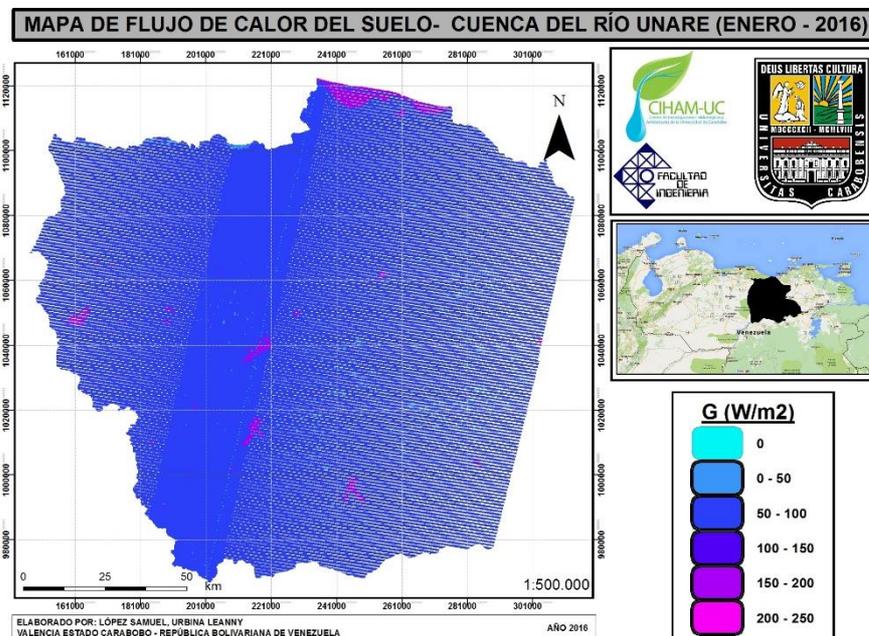


Figura 24. Mapa de Flujo de Calor del suelo correspondiente al mes de enero de 2016

Puede observarse que para el mes de enero de 2016, los cuerpos de agua presentarían valores de Flujo de Calor del Suelo dentro del rango de 1500 W/m^2 a 200 W/m^2 . Las coberturas correspondientes a agricultura, zonas urbanas y vegetación en general, presentan valores que se encuentran entre los 50 W/m^2 y 100 W/m^2 . (ver Figura 24)

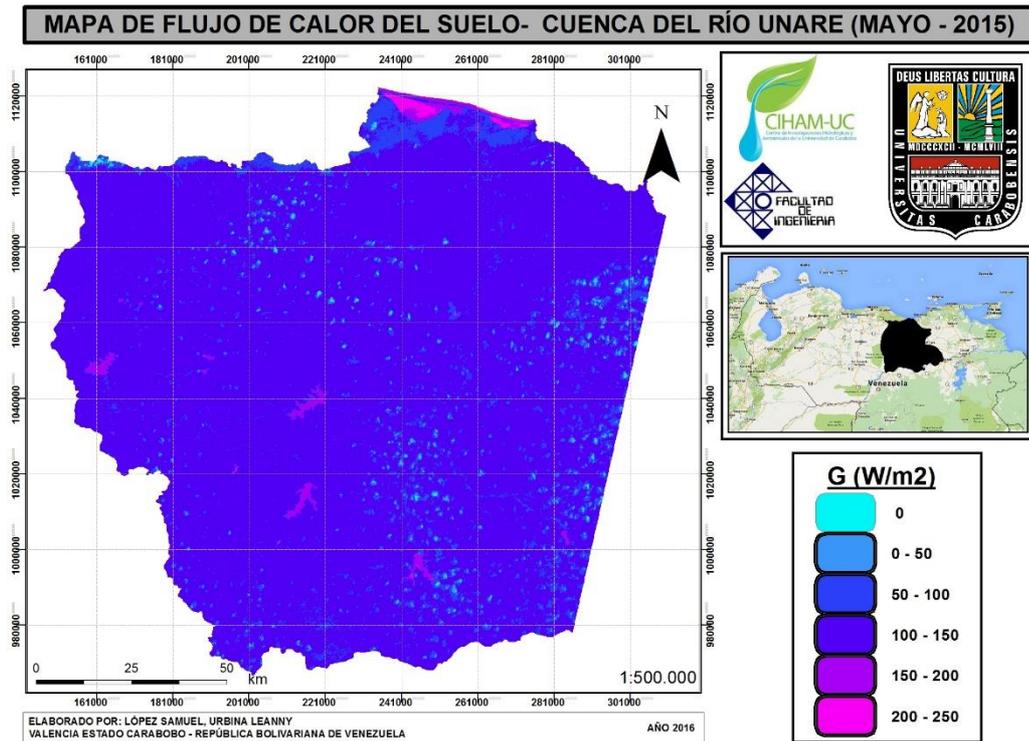


Figura 25. Mapa de Flujo de Calor del suelo correspondiente al mes de mayo de 2015

En el caso del mes de mayo de 2015 (ver Figura 25), la cuenca del Río Unare presenta valores de Flujo de Calor del Suelo en los cuerpos de agua que varían entre 150 W/m^2 y 200 W/m^2 , para el caso de la región de cuenca alta y valores de esta variable de entre 200 W/m^2 y 250 W/m^2 para los que pertenecen a la zona de la cuenca baja. Además, se observa que los valores de G para la vegetación ubicada en los alrededores de las lagunas de Unare y Píritu (cuenca baja), varía entre 0 W/m^2 y 50 W/m^2 . Sin embargo, en línea general, el valor predominante para las coberturas en general varía entre 100 W/m^2 y 150 W/m^2 .

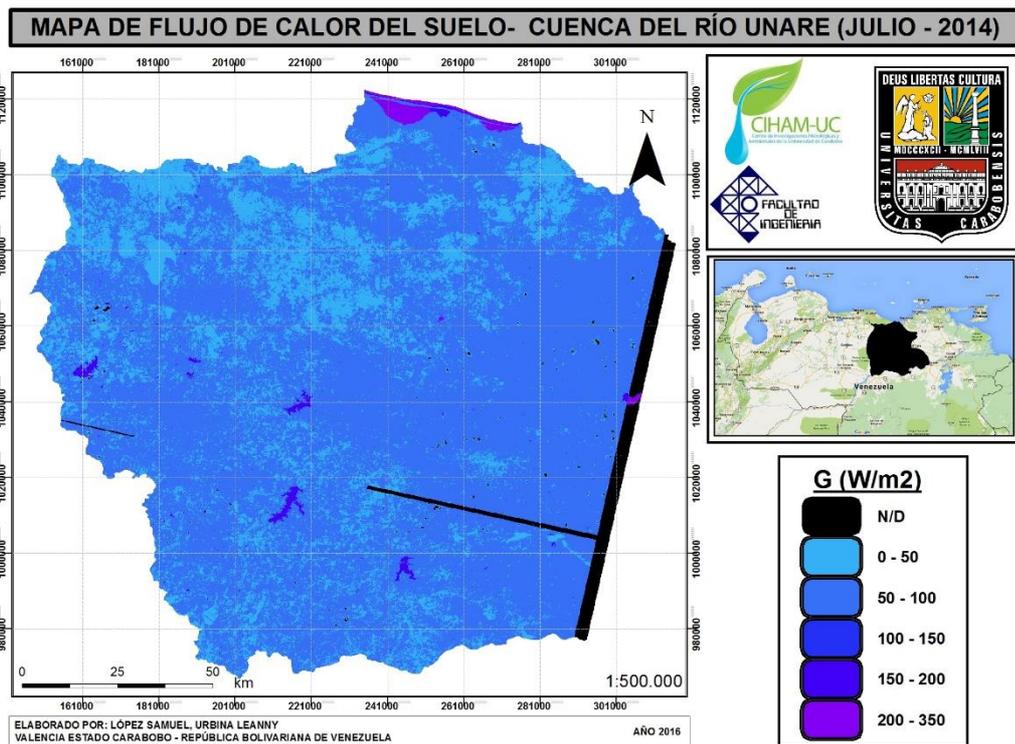


Figura 26. Mapa de Flujo de Calor del suelo correspondiente al mes de julio de 2014

El mes de julio del año 2014, presenta valores de Flujo de Calor del Suelo dentro del rango de los 0 W/m² y 100 W/m² para la vegetación en general. Asimismo, los cuerpos de agua ubicados en la zona de cuenca alta, muestran valores que varían entre 100 W/m² y 150 W/m², a diferencia de los ubicados en la zona de cuenca baja, los cuales oscilan entre 200 W/m² y 300 W/m². Las zonas agrícolas presentan valores marcados de aproximadamente 1500 W/m² y 200 W/m². (ver Figura 26)

Los valores que se muestran en el mapa que se encuentran fuera de rango (indicados como N/D), se deben a un error en la máscara de procesamiento al momento de la ejecución de los cálculos pertinentes, mas no a un comportamiento de la cuenca.

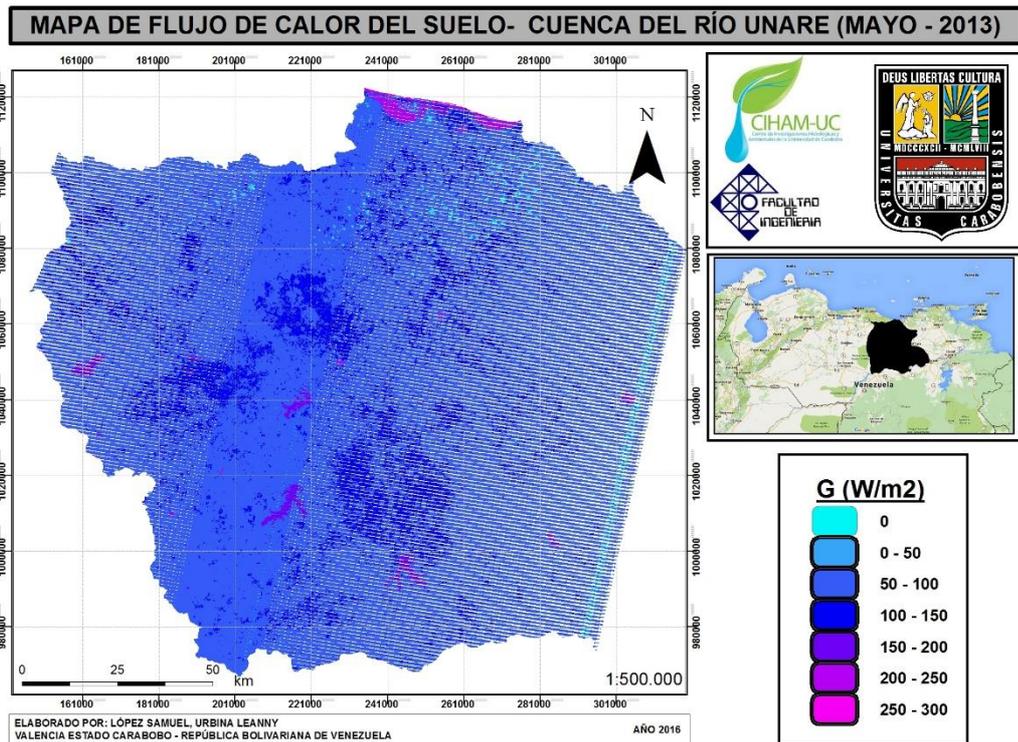


Figura 27. Mapa de Flujo de Calor del suelo correspondiente al mes de mayo de 2013

La cuenca el Río Unare, presenta un valor de Flujo de Calor del Suelo para los cuerpos de agua de 250 W/m^2 ; no obstante, los ubicados en la parte alta de dicha cuenca, muestran un valor máximo de 200 W/m^2 . Por otra parte, la cubierta de vegetación ubicada en la zona central de la cuenca presenta valores de hasta 150 W/m^2 al igual que las zonas agrícolas de la cuenca mientras que las zonas restantes que presentan este tipo de vegetación, muestra valores máximos de Flujo de Calor del Suelo de 100 W/m^2 . (ver Figura 27)

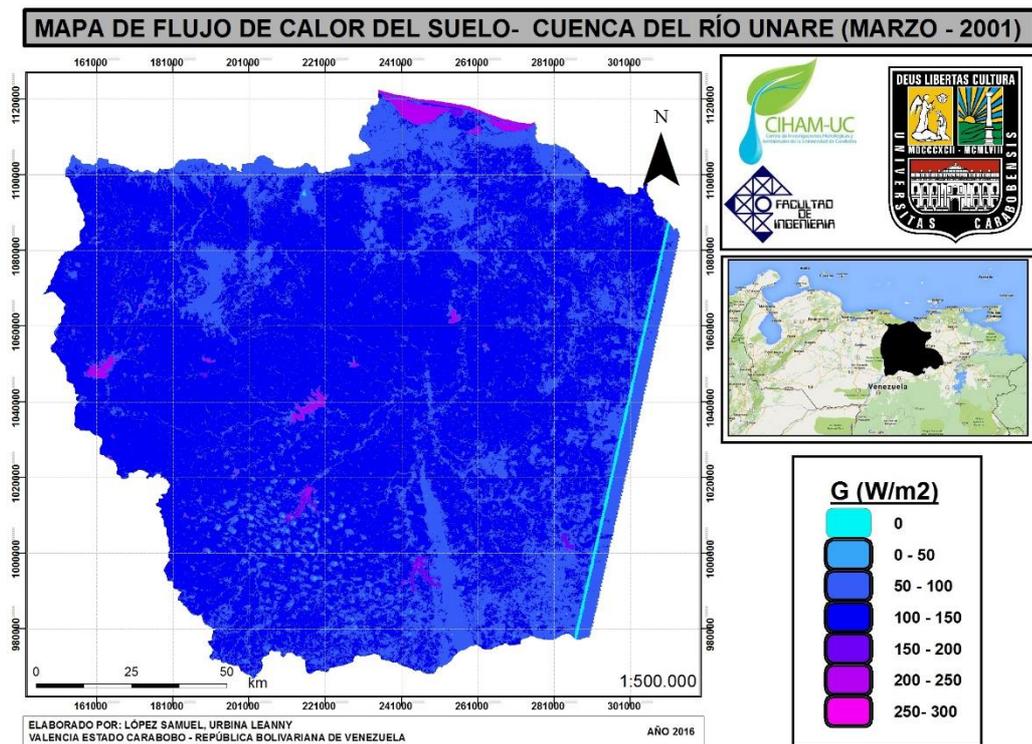


Figura 28. Mapa de Flujo de Calor del suelo correspondiente al mes de marzo de 2001

El mes de marzo del año 2001 muestra un rango predominante que va desde los 100 W/m² hasta los 150 W/m² para el caso de la vegetación en general; mientras de los cuerpos de agua de toda la cuenca, muestran Flujo de Calor del Suelo que varían entre 200 W/m² y 250 W/m², aproximadamente, tal como se puede apreciar en la Figura 28.

En línea general, la cuenca del Río Unare, ubicada entre los estados Guárico y Apure manifiesta, para las épocas de sequía, los valores más altos de Flujo de Calor del Suelo para las coberturas que la componen, mientras que los mapas de esta variable se muestran con rangos más variados para las épocas de invierno. Otra característica común, la cual puede apreciarse en los mapas antes mostrados, es el hecho de que los mayores valores de Flujo de Calor del Suelo G son mayores en las zonas de suelo desnudo y/o vegetación baja.

Flujo de Calor Sensible

Tal como se define en el capítulo II, el Flujo de Calor Sensible H , se estima como la tasa de pérdida de calor del aire por convección y conducción, la cual varía principalmente por las características de la resistencia aerodinámica de la cobertura del suelo y las condiciones atmosféricas que se presentan en la zona de estudio. De manera general, los valores obtenidos de los mapas generados, varían entre de 0 W/m^2 y 1200 W/m^2 entre los diferentes años de estudio.

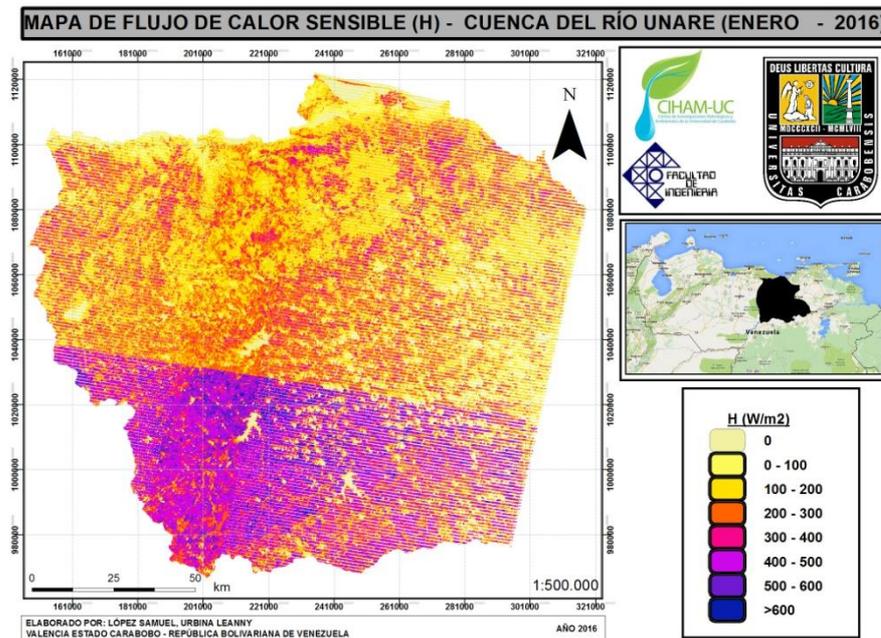


Figura 29. Mapa de Flujo de Calor Sensible correspondiente al mes de enero de 2016

En el mapa de Flujo de Calor Sensible correspondiente al mes de enero del año 2016 (ver Figura 29), se puede observar que los cuerpos de agua poseen un rango entre 0 W/m^2 y 100 W/m^2 . Por su parte, la cobertura vegetal presenta valores aproximados de entre 200 W/m^2 y 300 W/m^2 , en la parte baja de la cuenca del Río Unare. La parte Alta de esta, presenta valores de entre 300 W/m^2 y 600 W/m^2 .

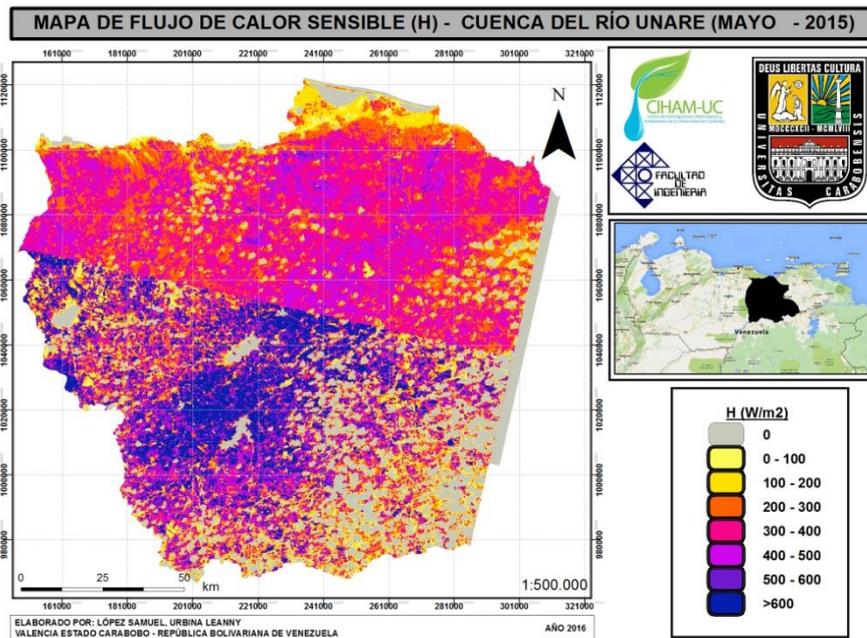


Figura 30. Mapa de Flujo de Calor Sensible correspondiente al mes de mayo de 2015

Mediante la Figura 30, se puede apreciar que los cuerpos de agua para el mes de mayo de 2015, generan valores de Flujo de Calor Sensible casi nulos (0 W/m^2). Además, se observa que la cobertura vegetal cercana a los cuerpos de agua, más específicamente a las lagunas de Unare y Píritu, arrojan valores de entre 100 W/m^2 y 200 W/m^2 . También, puede apreciarse que las coberturas correspondientes a las zonas urbanas presentan rangos de entre 200 W/m^2 y 300 W/m^2 . En forma general, se puede observar que los valores más bajos del rango, se presentan en la parte baja de la cuenca del Río Unare.

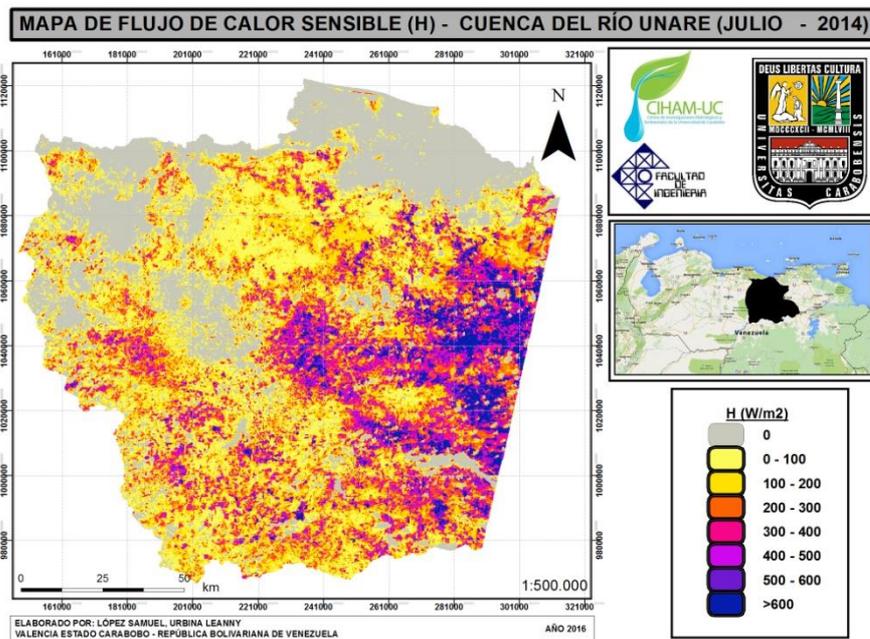


Figura 31. Mapa de Flujo de Calor Sensible correspondiente al mes de julio de 2014

Para el mes de julio del año 2014, se presenta un comportamiento uniforme a lo largo de la superficie de la cuenca, con valores de Flujo de Calor Sensible de entre 100 W/m^2 y 200 W/m^2 . Adicionalmente, se observa que los cuerpos de agua y las zonas cercanas a estos, presentan valores casi nulos de esta variable. También, se aprecian valores dispersos dentro de los 300 W/m^2 y 400 W/m^2 . (Ver Figura 31)

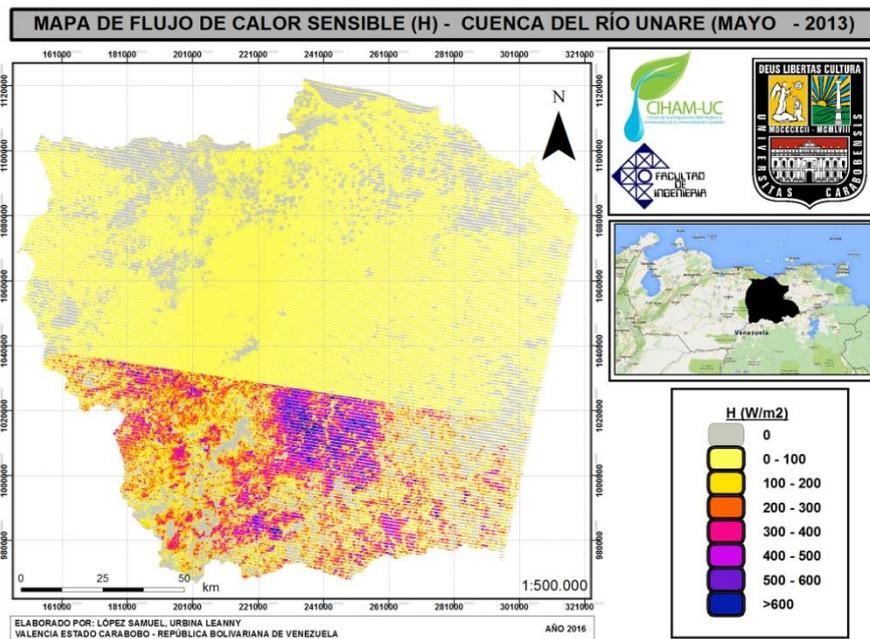


Figura 32. Mapa de Flujo de Calor Sensible correspondiente al mes de mayo de 2013

El comportamiento obtenido para la cuenca del Río Unare para el año 2013 (ver Figura 32) es atípico en cuando a la distribución de Flujo de Calor Sensible, es decir, la parte baja de la cuenca presenta valores máximos de 100 W/m^2 , independientemente de la cobertura del suelo, mientras que a parte alta de la cuenca en estudio, presenta un comportamiento más uniforme, con valores de la variable que oscilan entre 100 W/m^2 y 500 W/m^2 , aproximadamente. Sin embargo, los cuerpos de agua, al igual que en los años 2014 y 2015, presentan valores que se encuentran alrededor de los 0 W/m^2 .

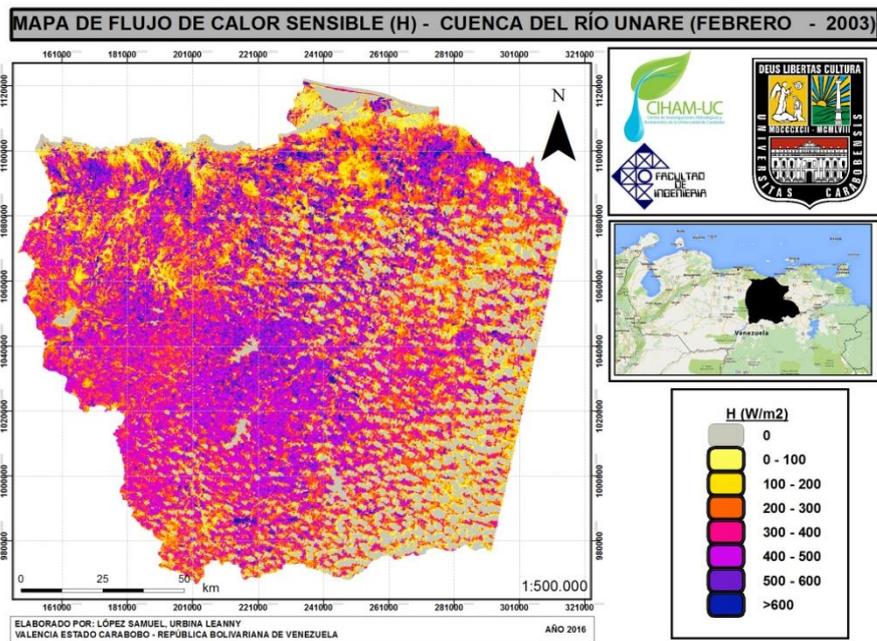


Figura 33. Mapa de Flujo de Calor Sensible correspondiente al mes de febrero de 2003

Por su parte, el mapa que representa al Flujo de Calor Sensible en la cuenca del Río Unare para el mes de febrero del año 2003, presenta un comportamiento uniforme donde predominan valores que se ubican dentro de los 300 W/m² y 500 W/m² para las coberturas de vegetación en general, incluyendo las zonas agrícolas. Los cuerpos de agua, presenta valores dentro cercanos a 0 W/m². Mientras que las zonas urbanas presentan Flujos de Calor Sensible de entre 200 W/m² y 300 W/m². (ver Figura 33)

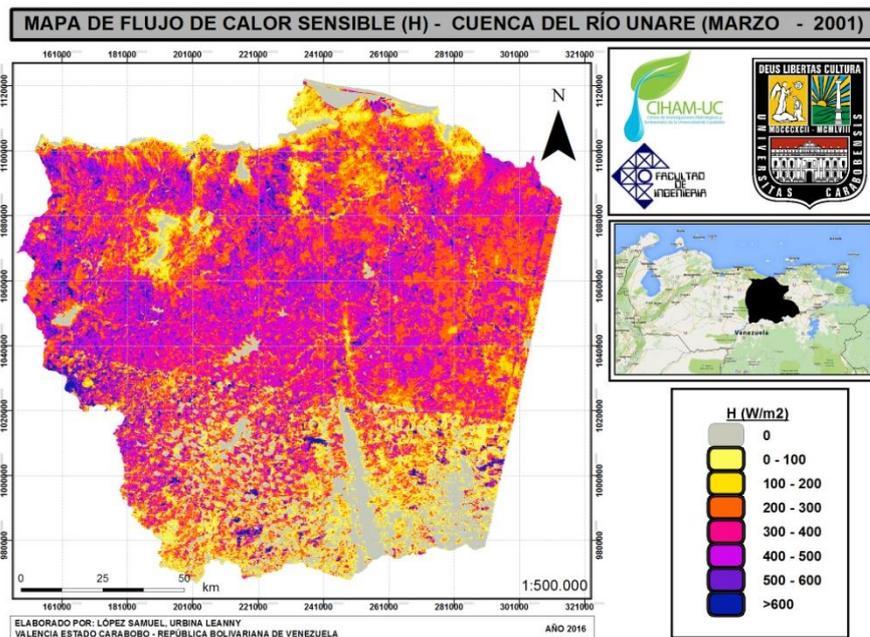


Figura 34. Mapa de Flujo de Calor Sensible correspondiente al mes de marzo de 2001

Puede observarse que el mapa de Flujo de Calor Sensible perteneciente al mes de marzo del año 2001, muestra cuerpos de agua con valores prácticamente nulos de esta variable, así como también valores de entre 400 W/m^2 y 500 W/m^2 para la cobertura correspondiente a las zonas de suelo desnudo. Además, se observan valores que oscilan entre los 200 W/m^2 y 400 W/m^2 en las zonas montañosas.

En línea general, los valores más bajos de Flujo de Calor Sensible, se pueden observar en los cuerpos de agua, seguidos de las zonas con vegetación abundante. Por el contrario, los valores más altos de esta variable, se presentaron en las zonas de suelo desnudo así como también en zonas urbanas. Adicionalmente, se puede apreciar que los mayores rangos predominan en la parte alta de la cuenca del Río Unare.

Castañeda (2013) en su estudio sobre una región del río Yaqui ubicado en México, obtuvo los máximos valores de Flujo de Calor Sensible en los suelos desnudos y los valores más bajos de esta variable sobre las zonas con mayores

índices de vegetación; esto mediante la aplicación de una variación del modelo SEBAL.

Evapotranspiración

Los valores obtenidos de evapotranspiración mensual se estimaron con base en la evapotranspiración diaria, la cual no fue más que el producto de la evapotranspiración diaria por un número promedio de días del mes, en este caso, 30 días. Los siguientes mapas representan la evapotranspiración mensual, en donde el mes de enero de 2016 presenta valores que oscilan entre 200 mm/mes a 250 mm/mes . En el caso del mes de mayo de 2015, los valores se encuentran entre 100 mm/mes y 150 mm/mes ; para julio del año 2014, mayo del año 2013, febrero del año 2003 y marzo del año 2001, los valores máximos varían entre 150 mm/mes a 200 mm/mes .

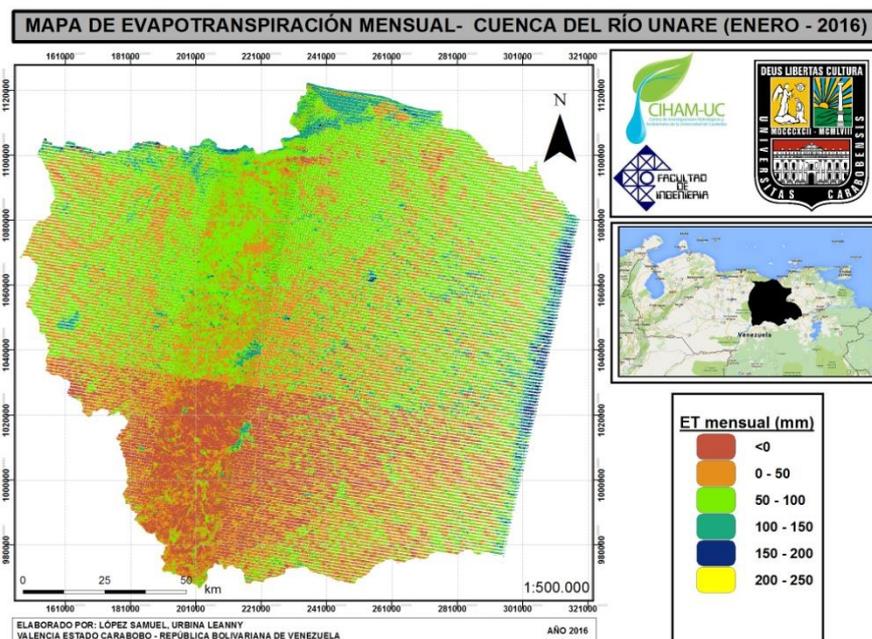


Figura 35. Mapa de evapotranspiración mensual correspondiente al mes de enero de 2016

El comportamiento de la cuenca con respecto a sus niveles de evapotranspiración para el mes de enero de 2016, presenta para los cuerpos de agua niveles de ET de hasta 150 mm/mes . En la parte baja de la cuenca se observa un rango

predominante de hasta 100 mm/mes para la vegetación en general, mientras que las zonas agrícolas muestran valores dentro de un rango de 0 mm/mes a 50 mm/mes . Por otra parte, la parte alta de la cuenca presenta un gran porcentaje de valores negativos de *ET* para la vegetación en general. (Ver Figura 36)

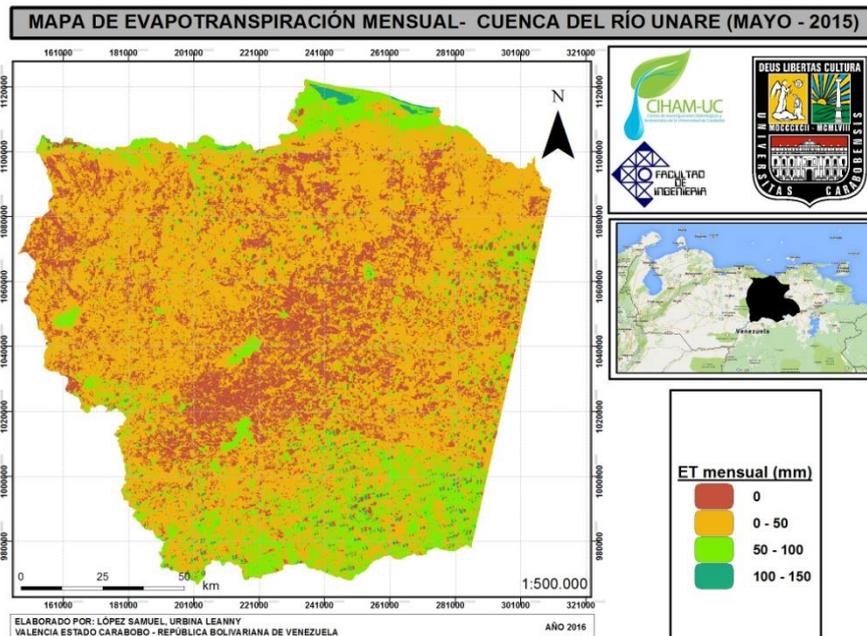


Figura 36. Mapa de evapotranspiración mensual correspondiente al mes de mayo de 2015

De acuerdo con la Figura 37, la cual corresponde a los niveles de Evapotranspiración de la cuenca del Río Unare para el mes de mayo del año 2015, puede apreciarse que la parte baja de dicha cuenca, presenta valores de *ET* dentro de los 100 mm/mes y 150 mm/mes en los cuerpos de agua; tal es el caso de las lagunas de Unare y Píritu.

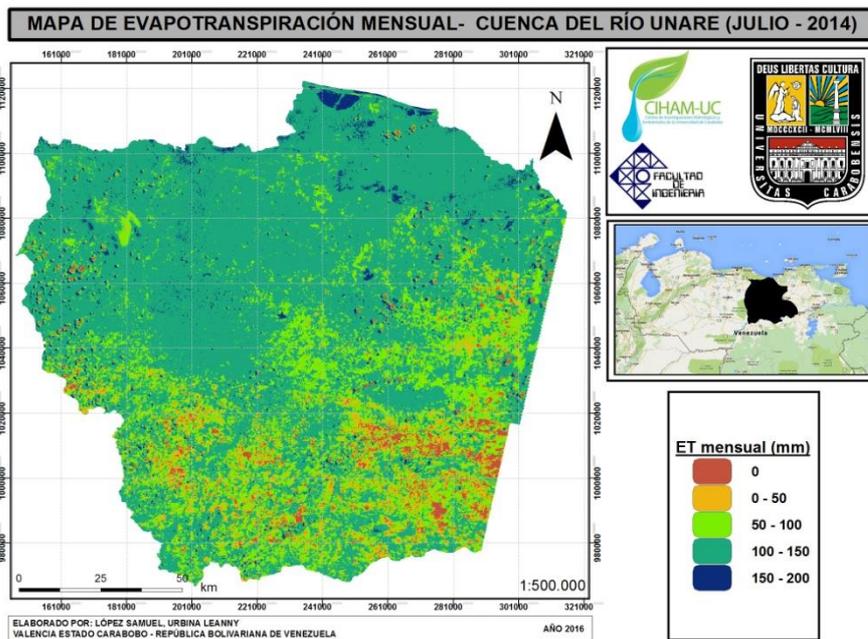


Figura 37. Mapa de evapotranspiración mensual correspondiente al mes de julio de 2014

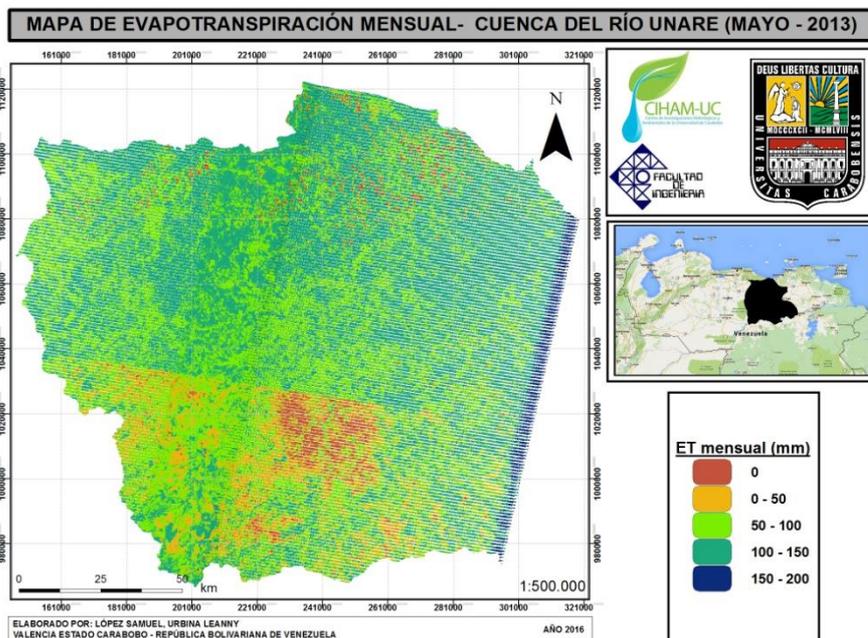


Figura 38. Mapa de evapotranspiración mensual correspondiente al mes de mayo de 2013

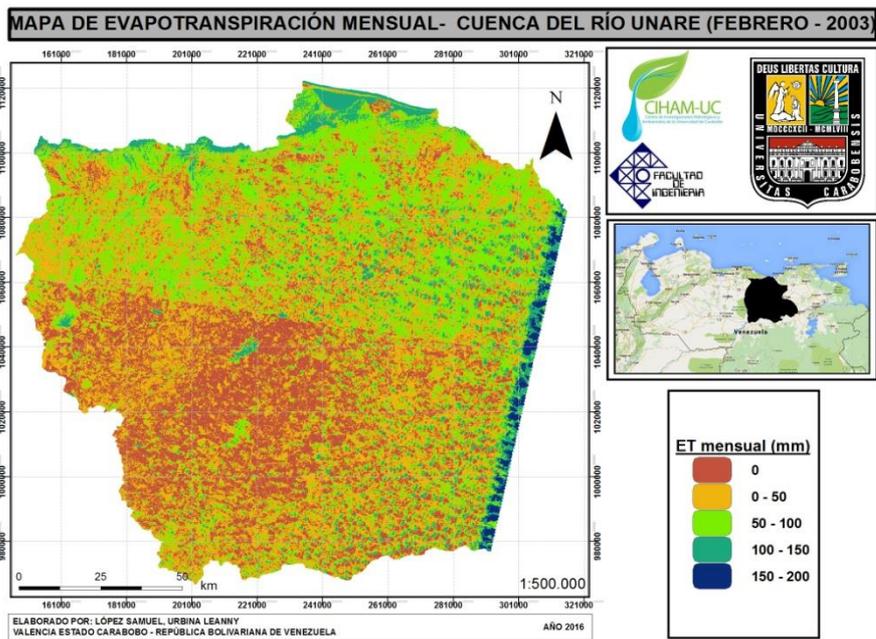


Figura 39. Mapa de evapotranspiración mensual correspondiente al mes de febrero de 2003

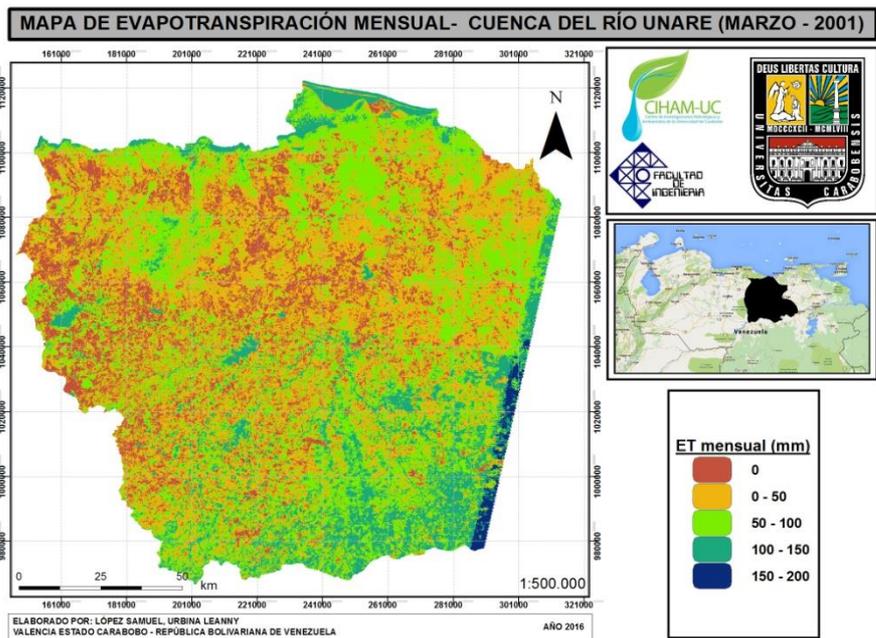


Figura 40. Mapa de evapotranspiración mensual correspondiente al mes de marzo de 2001

Precipitación

Para el balance hídrico, se requiere conocer la precipitación, la cual se obtiene al realizar mapas con isoyetas para cada mes de las imágenes satelitales. Para estos mapas se requiere la elaboración de hietogramas para determinar la precipitación mensual de las estaciones, en este caso, del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Obtenidos los hietogramas, se procede a elaborar los mapas con isoyetas utilizando herramientas del software ArcGis.

En la Figura 42 se muestra un ejemplo de uno de los hietogramas de la estación Mapire, ubicada en el estado Anzoátegui en la República Bolivariana de Venezuela donde se representa un evento ocurrido en la cuenca del río Unare.

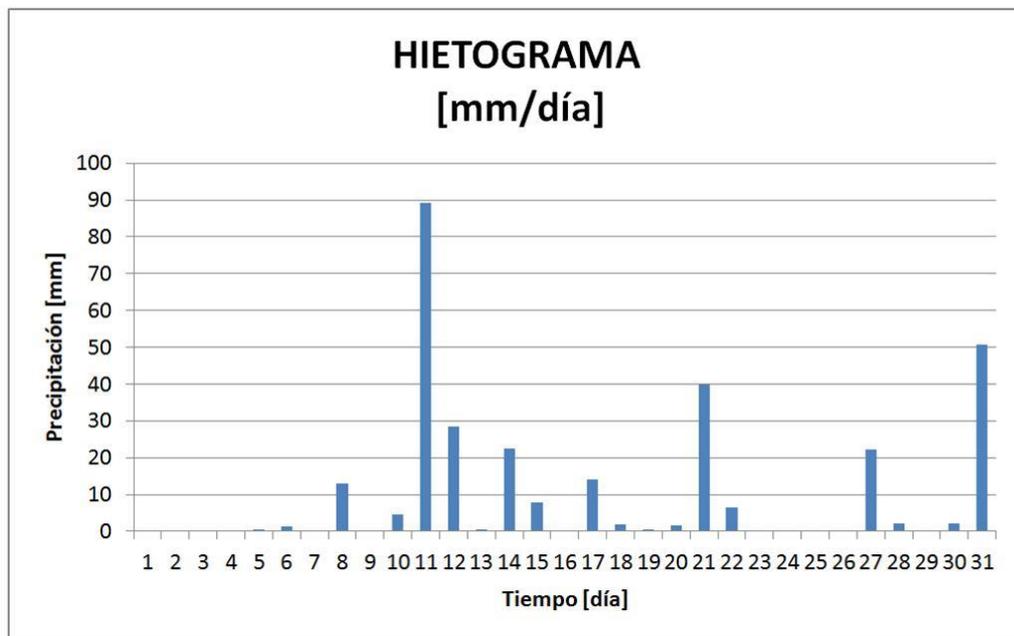


Figura 41. Hietograma de la estación Mapire correspondiente al mes de julio de 2014 (duración: 30 días)

En el anexo 8 se puede apreciar que en los años 2001, 2003 y 2016 la precipitación es escasa, esto es debido a que se encuentran en meses de temporada de sequía; caso contrario para la precipitación en los años 2013, 2014 y 2015 que se ubican en meses de temporada de lluvia. A continuación, se presentan todos los mapas de precipitación para cada fecha de estudio.

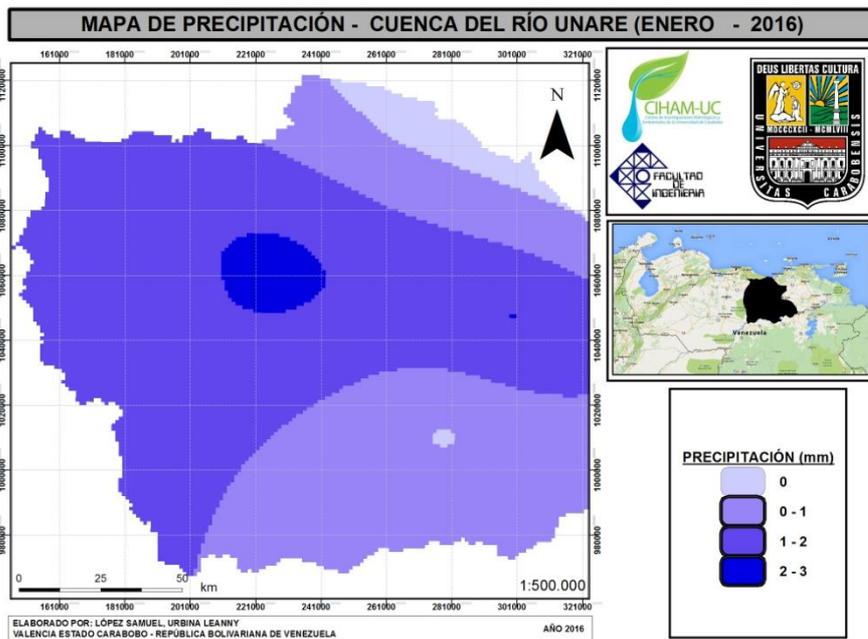


Figura 42. Mapa de Precipitación correspondiente al mes de enero de 2016

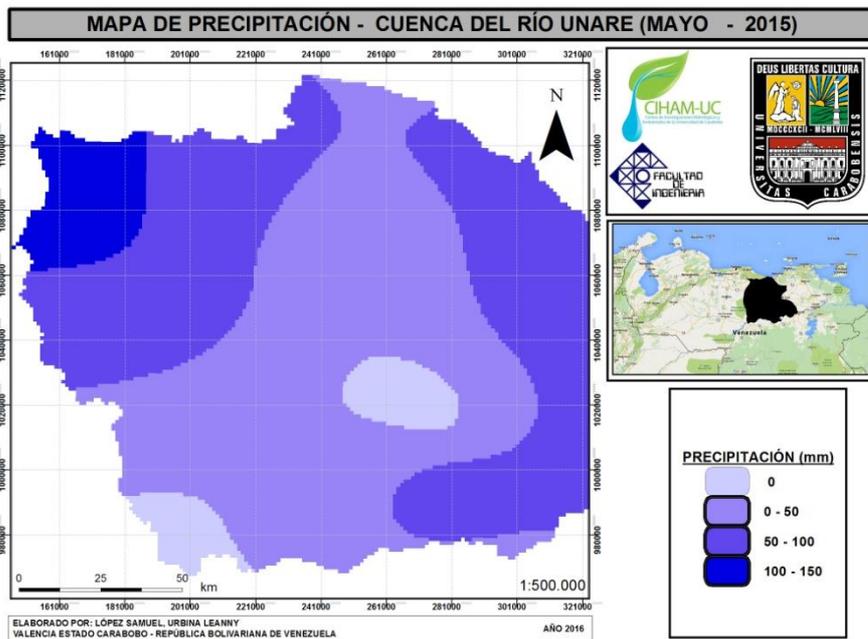


Figura 43. Mapa de Precipitación correspondiente al mes de mayo de 2015

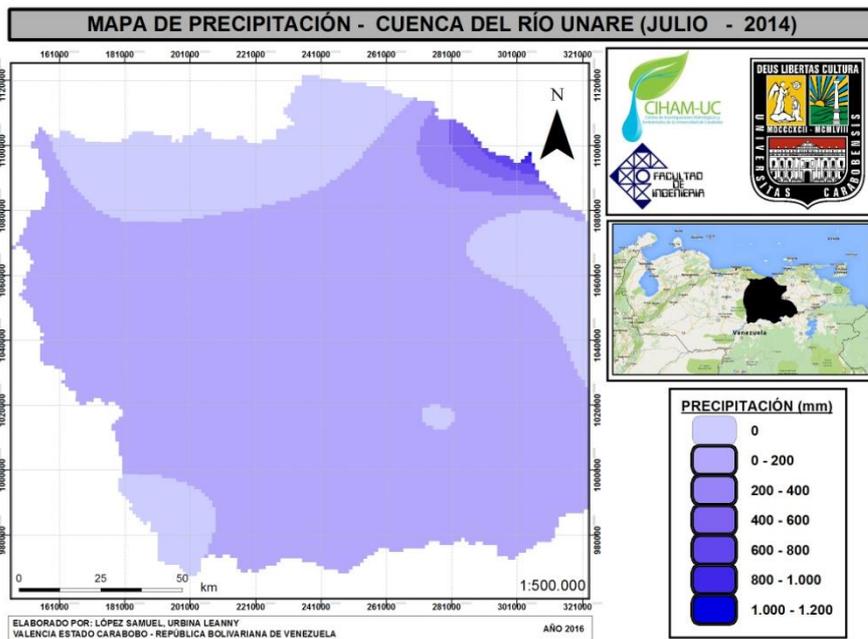


Figura 44. Mapa de Precipitación correspondiente al mes de julio de 2014

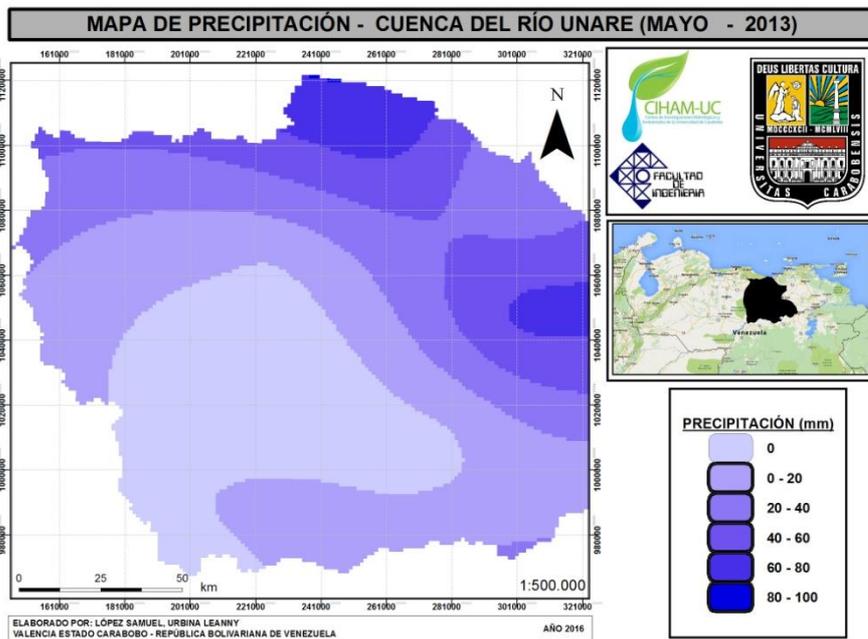


Figura 45. Mapa de Precipitación correspondiente al mes de mayo de 2013

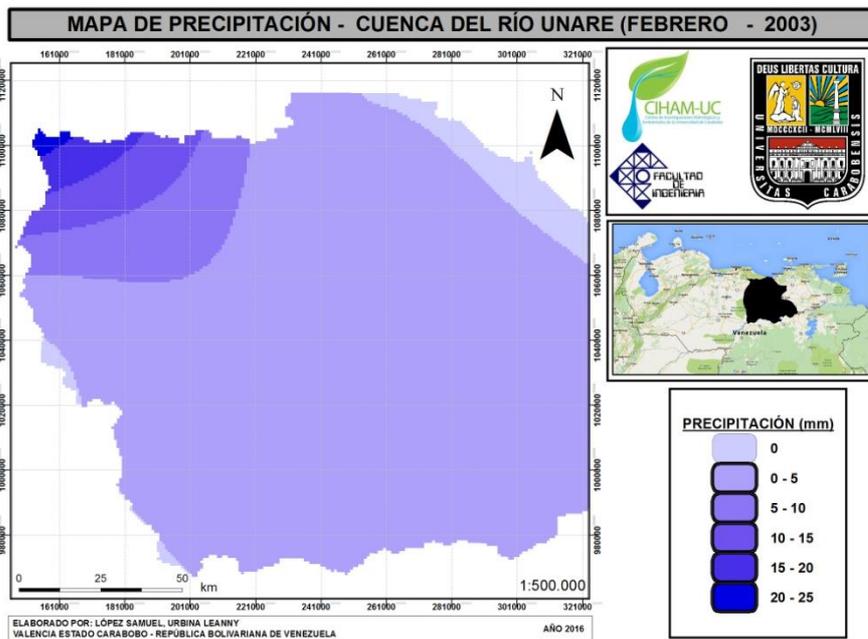


Figura 46. Mapa de Precipitación correspondiente al mes de febrero de 2003

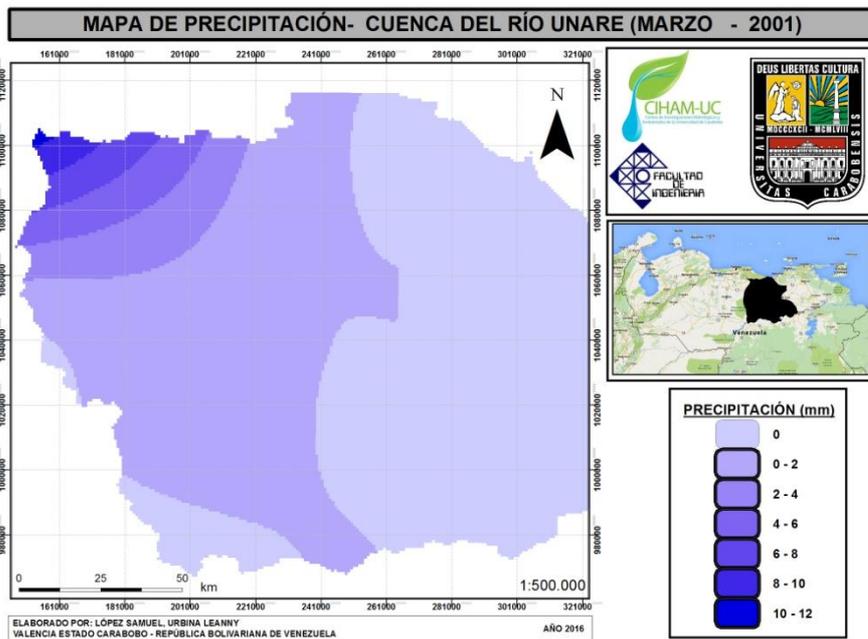


Figura 47. Mapa de Precipitación correspondiente al mes de marzo de 2001

Aplicar el modelo SEBAL para la estimación de la producción hídrica de la cuenca del Río Unare mediante el análisis de imágenes satelitales

Es importante conocer la producción hídrica, ya que debido a esto es posible determinar la cantidad de agua que produce la cuenca en estudio. Además, es una herramienta útil que ayuda a administrar este recurso del agua, puesto que los mapas de producción hídrica identifican las zonas de mayor y menor producción de agua para un tiempo determinado. La aplicación del modelo SEBAL y el balance hídrico arrojan como resultado los siguientes mapas de producción hídrica:

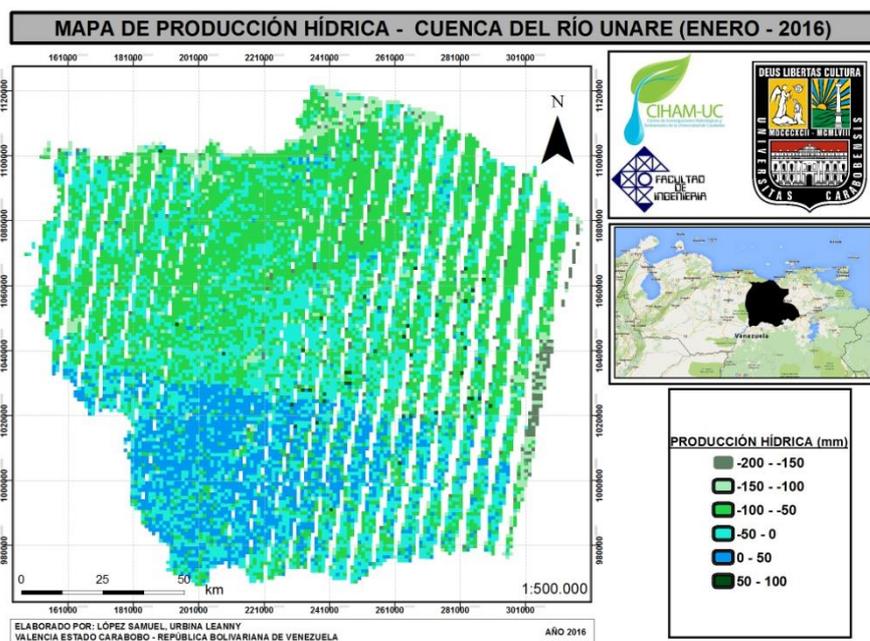


Figura 48. Mapa de Producción Hídrica correspondiente al mes de enero de 2016

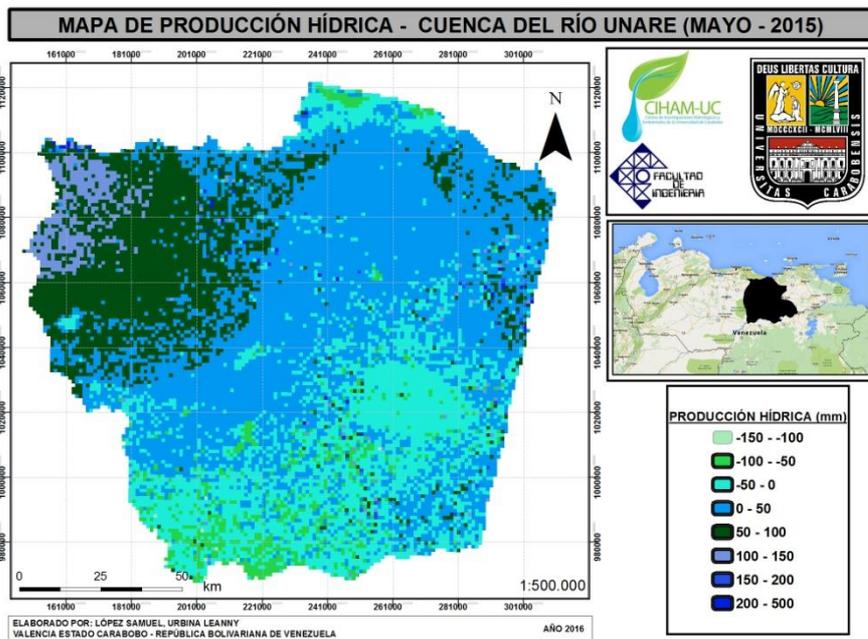


Figura 49. Mapa de Producción Hídrica correspondiente al mes de mayo de 2015

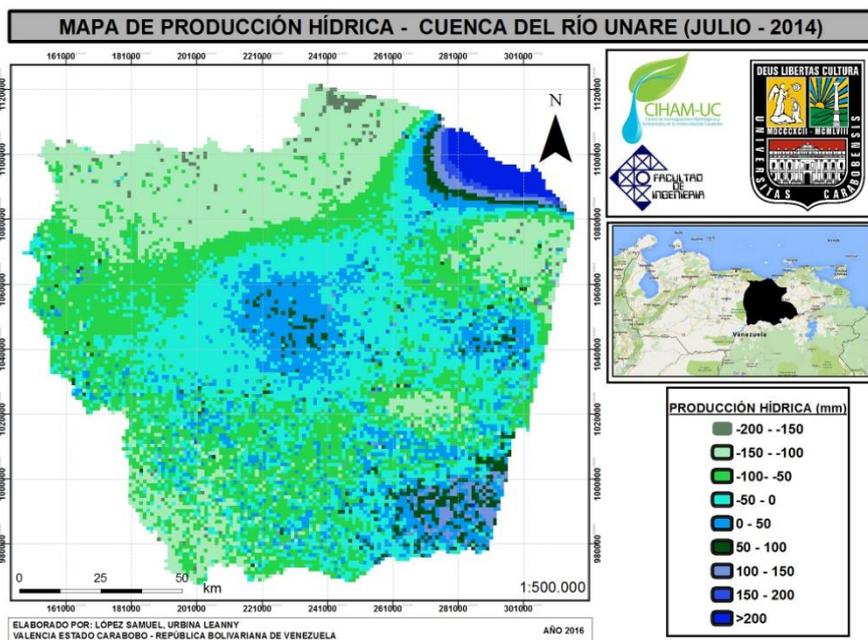


Figura 50. Mapa de Producción Hídrica correspondiente al mes de julio de 2014

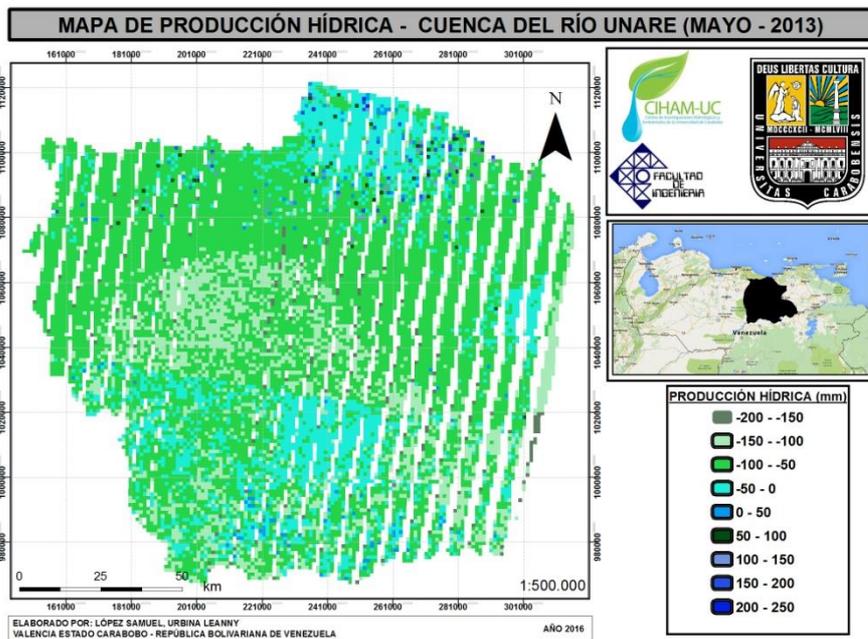


Figura 51. Mapa de Producción Hídrica correspondiente al mes de mayo de 2013

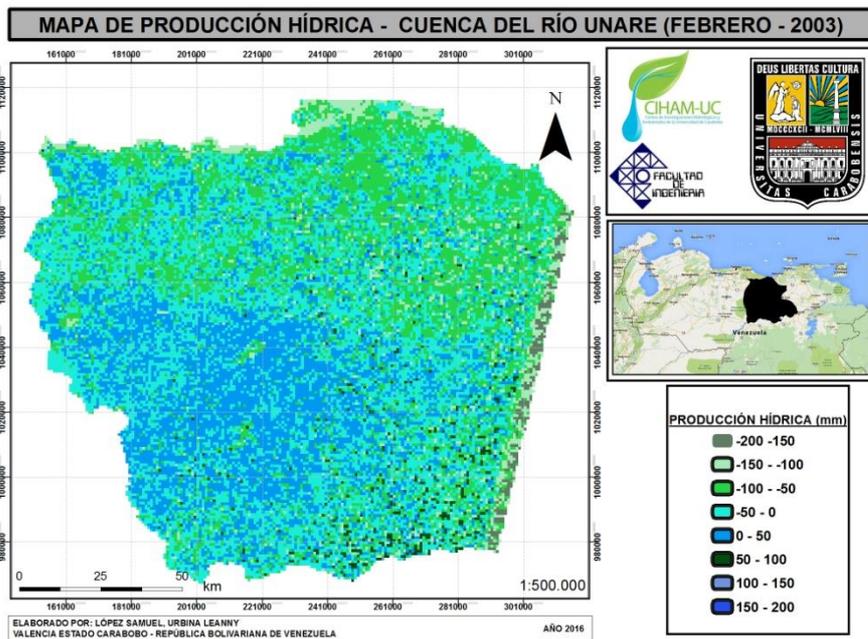


Figura 52. Mapa de Producción Hídrica correspondiente al mes de febrero de 2003

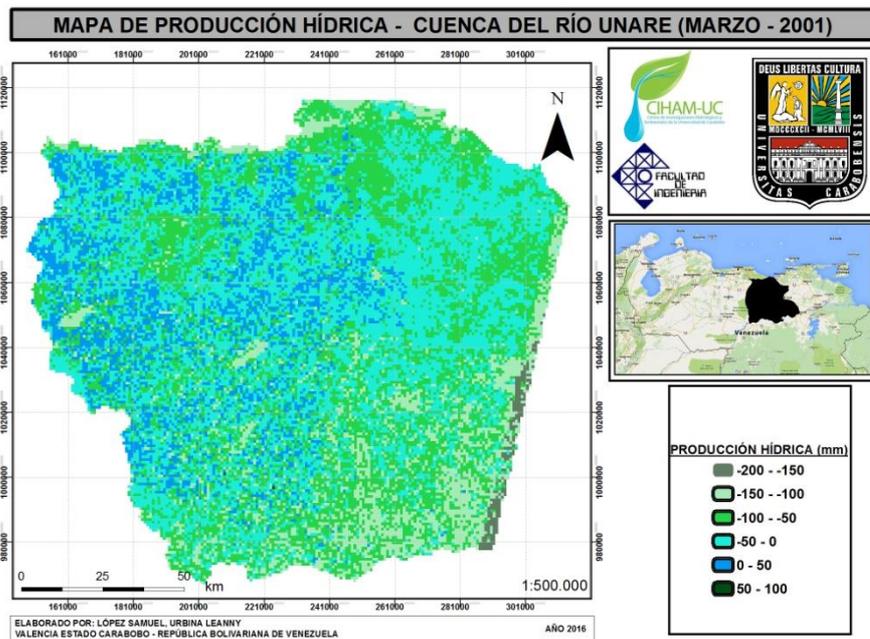


Figura 53. Mapa de Producción Hídrica correspondiente al mes de marzo de 2001

Analizar la variación espacial y temporal de la producción hídrica mediante el análisis de imágenes satelitales en la cuenca del Río Unare

Finalmente, se analiza la variación espacio temporal de la producción hídrica en función a las diversas coberturas de suelo: cobertura agrícola, vegetación, zona urbana y cuerpos de agua. Dicho análisis se realiza para cada fecha estudiada, logrando así identificar en qué zonas de la cuenca existe mayor producción hídrica y en qué zonas la menor producción de agua.

En las siguientes imágenes se presenta la comparación de varias muestras de diferentes coberturas de suelo a través de gráficos de caja y bigotes para todas las fechas de estudio, tomadas de los mapas de balance hídrico.

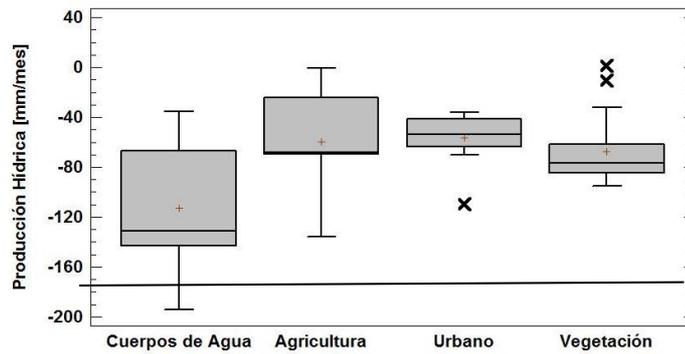


Figura 54. Producción Hídrica para las diferentes coberturas de suelo correspondiente al mes de enero de 2016

Para enero de 2016 (ver Figura 54) todos los valores correspondientes a la producción hídrica se encuentran por debajo de cero, implicando que para este mes existe una mayor evapotranspiración que de precipitación, lo cual significa, que la cuenca perdió agua ese mes. Los valores de la producción hídrica de las coberturas de suelo agrícola, urbana y de vegetación se encuentran en un valor promedio de -70 mm/mes y para los cuerpos de agua posee un valor promedio de -110 mm/mes .

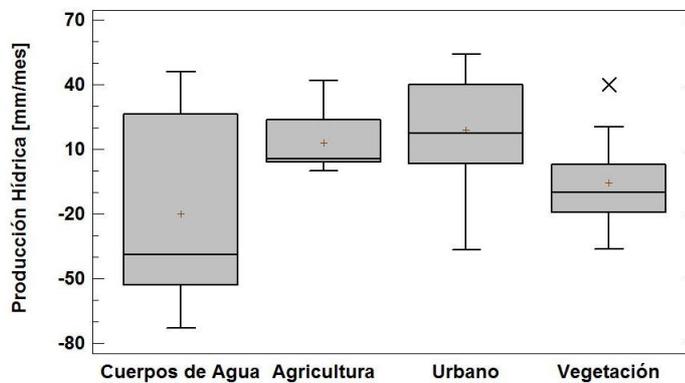


Figura 55. Producción Hídrica para las diferentes coberturas de suelo correspondiente al mes de mayo de 2015

Para el año 2015, se presentan valores positivos de producción hídrica (ver Figura 55); esto quiere decir que la cuenca logra producir agua para ese mes. En dicho grafico se puede ver que en la cobertura urbana existe el mayor valor de precipitación con respecto a las demás coberturas. También, se puede apreciar que la cobertura de vegetación apenas existe producción hídrica, lo cual implica que la

precipitación era igual a la evapotranspiración en esa zona para la fecha indicada (año 2015).

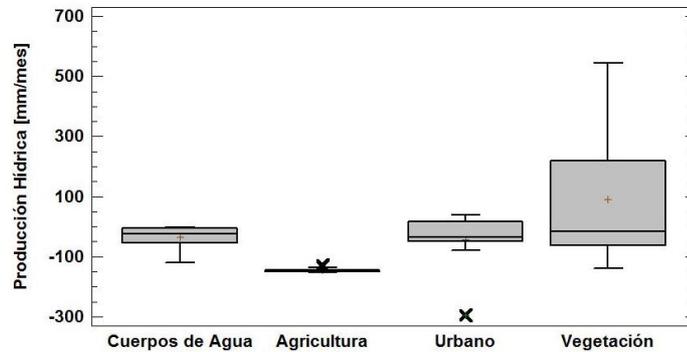


Figura 56. Producción Hídrica para las diferentes coberturas de suelo correspondiente al mes de Julio de 2014

Para el mes de julio de 2014, se aprecia en la Figura 56 que existen mayores valores de producción hídrica con respecto a los demás años en estudio, pero esto solo se evidencia en la cobertura de vegetación, alcanzando valores de 500 mm/mes.

El resto de las coberturas del suelo mantienen una producción con valores promedios negativos de 50 mm/mes, donde el mayor déficit se encuentra en la cobertura de agricultura con valores negativos de hasta 100 mm/mes.

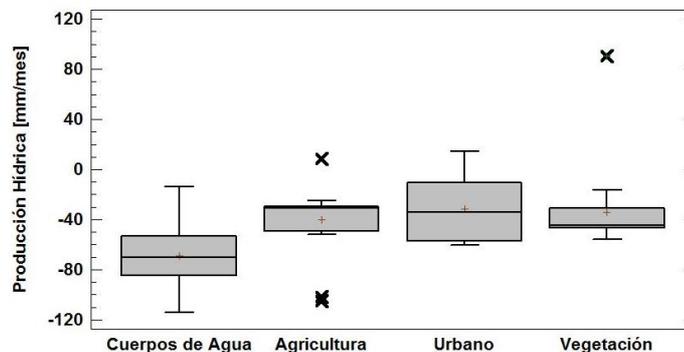


Figura 57. Producción Hídrica para las diferentes coberturas de suelo correspondiente al mes de mayo de 2013

Para el año 2013 (ver Figura 57) todos los valores se encuentran por debajo de cero, implicando que para ese mes existe un déficit en la producción hídrica alcanzando valores promedios de -40 mm/mes en las coberturas agrícola, urbana y de vegetación; para los cuerpos de agua, la producción hídrica promedio alcanza valores de -70 mm/mes.

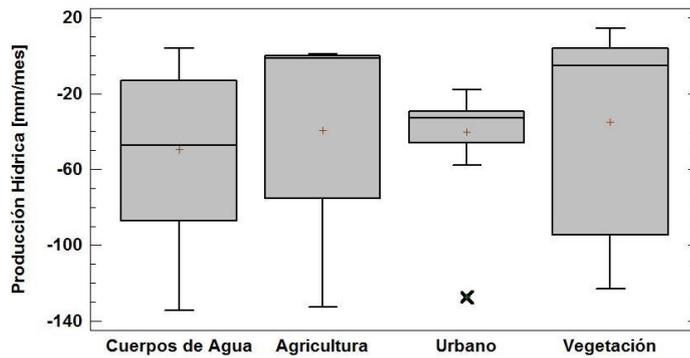


Figura 58. Producción Hídrica para las diferentes coberturas de suelo correspondiente al mes de febrero de 2003

El mes de mayo del año 2003 (ver Figura 58) todas las cubiertas que conforman la cuenca del Río Unare, presentaron déficit en la producción de agua, cuyo rango más variable pertenece a la vegetación en general con un promedio de -30 mm/mes . Las coberturas correspondientes a cuerpos de agua y agricultura, presentan rangos más bastante variables, cuyos promedios se ubican en 50 mm/mes y 40 mm/mes , respectivamente. Por su parte, las zonas urbanas presentan valores de producción hídrica poco variables, entre un rango de valores cuyo promedio se ubica en los -40 mm/mes .

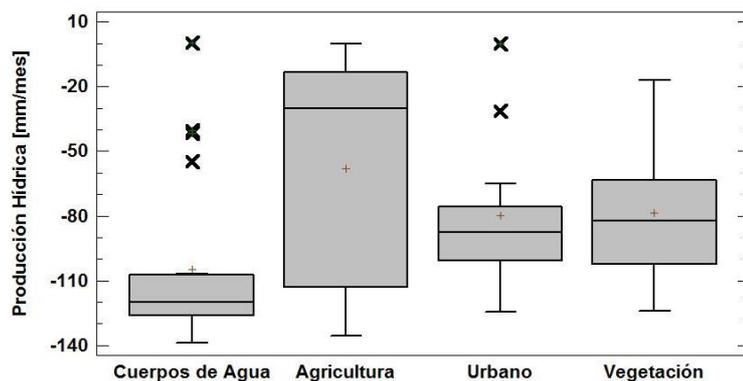


Figura 59. Producción Hídrica para las diferentes coberturas de suelo correspondiente al mes de Marzo de 2001

En la gráfica correspondiente al mes de marzo del año 2001 (ver Figura 59), se logra observar que todos los valores son negativos, implicando un déficit en la producción hídrica para todas las coberturas de suelo. En el gráfico se evidencia un valor promedio en la producción hídrica de -60 mm/mes para la cobertura agrícola, -80 mm/mes en promedio para las coberturas urbana y de vegetación y -120 mm/mes para cuerpos de agua.

A continuación se presentan los gráficos con la comparación de varias muestras de los diferentes años de estudio para cada cobertura de suelo a través de gráficos de caja y bigotes para todas las fechas de estudio, tomadas de los mapas de balance hídrico.

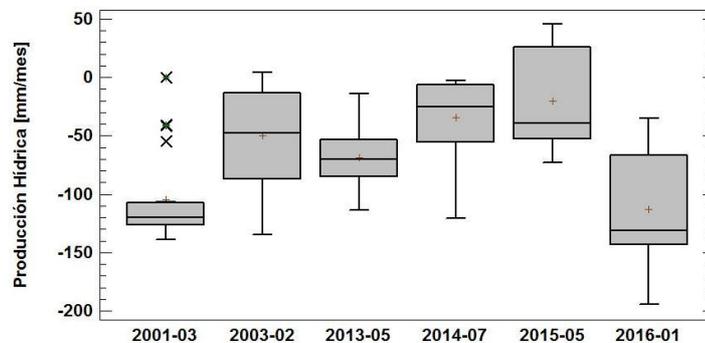


Figura 60. Producción Hídrica de cobertura de Cuerpos de Agua para todos los años de estudio

La Figura 60 muestra la producción hídrica para los cuerpos de agua, en función de los años analizados. Para febrero de 2003 y mayo del año 2015, se observa que la producción hídrica arroja valores positivos, lo que implica que la evapotranspiración no superó la precipitación en esas fechas. En el resto de las épocas analizadas, se presentan déficit de producción sobre los cuerpos de agua, siendo el año más crítico, el 2016.

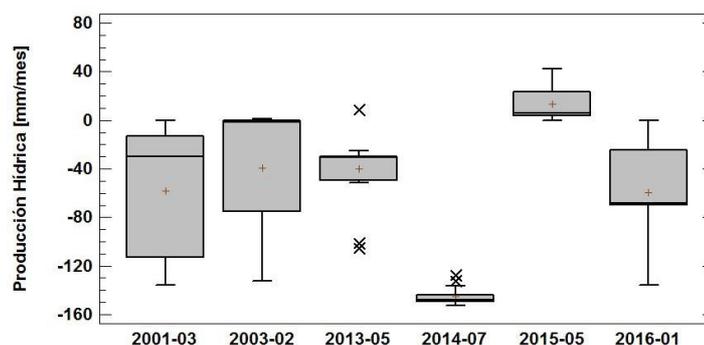


Figura 61. Producción Hídrica de cobertura Agrícola para todos los años de estudio

Tal como lo indica la Figura 61, el mayor déficit de producción hídrica sobre los campos agrícolas, se presenta en el mes de julio de 2014 cuyo valor promedio se aproxima a -140 mm/mes . Caso contrario ocurre en el mes de mayo del año 2015, donde la producción hídrica alcanza valores positivos, con un valor promedio de 20 mm/mes , alcanzando valores máximos cercanos a los 50 mm/mes . Por otra parte, se observa que la mayor variabilidad ocurre en el año 2016, existiendo déficits que alcanzan los -130 mm/mes .

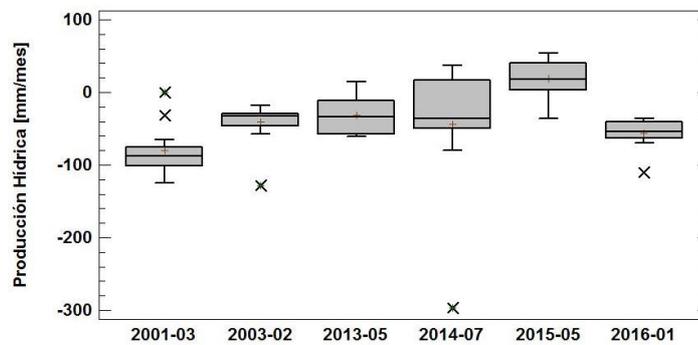


Figura 62. Producción Hídrica de cobertura Urbana para todos los años de estudio

En el caso de las zonas urbanas, puede apreciarse mediante la Figura 62 que el mayor déficit se produce en marzo del año 2001, alcanzando un mínimo de -120 mm/mes . El segundo mayor déficit ocurre en el mes de enero del año 2016, con un promedio de -50 . La cuenca sin embargo, produce hasta 20 mm/mes de agua en mayo del año 2013 en algunas zonas, presentando déficit de hasta -120 mm/mes en otras, para el mismo año mencionado. El mes de julio del año 2014 presenta el rango más variable de producción hídrica para las zonas urbanas, con valores que oscilan entre -300 mm/mes hasta 40 mm/mes . Finalmente, se puede apreciar que en el mes de mayo del año 2015, la cuenca produce en promedio 30 mm/mes , alcanzando un máximo de 60 mm/mes .

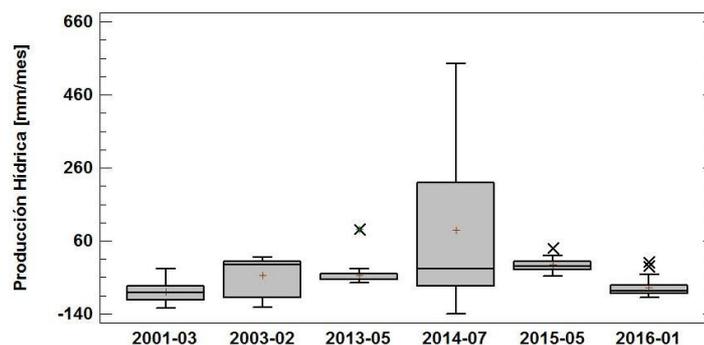


Figura 63. Producción Hídrica de cobertura de Vegetación para todos los años de estudio

A partir de la Figura 63, se puede apreciar que las zonas de la cuenca del Río Unare correspondientes a vegetación en general, presentan en su mayoría valores de producción hídrica positivos, en todos los años analizados. La mayor producción de agua ocurre en julio del año 2014, con un máximo de hasta 560 mm/mes . Este año mencionado también presenta el mayor déficit de $-140 \text{mm}/\text{mes}$. Por su parte, en el mes de mayo del año 2015 se presenta la menor variabilidad en el balance hídrico, con un promedio de $-15 \text{mm}/\text{mes}$. Un comportamiento similar se presenta en el mes de mayo del año 2013 y en el mismo mes del año, cuyas variaciones son pequeñas, cercanas a sus promedios de $-15 \text{mm}/\text{mes}$ $-40 \text{mm}/\text{mes}$.

CONCLUSIONES

Al culminar el desarrollo de las fases de este trabajo de investigación, cuyo objetivo principal consistió en analizar la variación espacial y temporal de la producción hídrica de la cuenca del Río Unare, mediante la aplicación del modelo SEBAL, se puede concluir lo siguiente:

Se demuestra la factibilidad de aplicar el modelo SEBAL a imágenes satelitales, para estimar de forma remota la evapotranspiración de la cuenca del Río Unare y todas aquellas variables físicas que intervienen en la producción hídrica de la cuenca en estudio para las fechas analizadas, de manera práctica y concreta, con un mínimo de información meteorológica requerida, permitiendo dar continuidad a este tipo de estudios, no solo en la cuenca del Río Unare, sino a cualquier otro ecosistema como parte de investigaciones de diversa magnitud.

Adicionalmente, fue posible la estimación remota de la producción hídrica en la cuenca del río Unare, ubicado entre los estados Guárico y Anzoátegui, mediante la aplicación del modelo SEBAL, ya que se dispuso de imágenes con buena resolución y la información meteorológica pertinente, logrando obtener mapas que reflejan de forma bastante aproximada, el comportamiento de dicha producción en la cuenca en estudio para diferentes años analizados.

La disponibilidad de mapas de precipitación, evapotranspiración y producción hídrica de la cuenca del Río Unare representan una herramienta útil para conocer su comportamiento a los largo de toda su extensión y a través de los años, lo cual es necesario para el conocimiento de la demanda hídrica de dicha cuenca. Esto representa un avance importante en cuando a la gestión integral de los recursos de la cuenca, incluyendo el desarrollo de nuevos proyectos orientados a la inclusión de tecnología, como la aplicada en esta investigación, así como también de las comunidades con miras a propiciar el desarrollo sustentable de la cuenca del Río Unare.

RECOMENDACIONES

- Es necesario disponer de imágenes satelitales cuyas escenas contemplen la menor presencia posible de porcentaje de nubosidad, debido a que estas generan distorsión en la generación de resultados.
- Se requiere de información meteorológica que cubra todos los períodos a analizar ya que esto conlleva a valores más precisos de todas las variables físicas estimadas, entre ellas la evapotranspiración y más aún de balance hídrico, ya que esta última depende directamente de la precipitación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Andreu, J. (1993): Análisis de Sistemas y Modelación en Conceptos y Métodos para la Planificación Hidrológica. CIMNE. Barcelona.

Bunge, M. (1985): La Investigación Científica. Ariel. Madrid.

Carlos A. Sabino (1986) El proceso de investigación

Correa, O. (2010) Estimación de la Producción Hídrica mediante la aplicación de modelos Hidrológicos en la Cuenca del Río Unare. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

Elementos del clima. Extraído el 18 de abril de 2016 de:

<http://historiaybiografias.com/clima2/>

Evapotranspiración de referencia. Extraído el 9 de febrero de 2016 de:

<http://www.fao.org/3/a-x0490s/x0490s01.pdf>

Estrela, T. (1996): Los SIG en Hidrología. Curso sobre la Utilización de los Sistemas de Información Geográfica en Hidrología .Cedex. Madrid.

Farías, B. (2015) Validación de Modelos de Estimación del Proceso Lluvia-Escorrentía en la Cuenca Del Rio Unare. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

García E. Llellish M. (2012) Estimación Espacial de la Et Mediante Imágenes Satelitales y el Modelo SEBAL en el Humedad Paraíso Huacho. Lima, Perú.

Guerrero J. (2012). Determinación del Índice de Área Foliar (IAF) a partir de imágenes de satélite. Extraído el 15 de febrero de 2016 de:

<https://joseguerreroa.wordpress.com/2012/03/27/determinacion-del-indice-de-area-foliar-iaf-a-partir-de-imagenes-de-satelite-con-grass-en-qgis/>

Hernández Sampier, Roberto Metodología de la Investigación Editorial Félix Valera, la Habana

Humedad relativa. Extraído el 19 de abril de 2016 de:

<https://content.meteoblue.com/es/ayuda/parametros/humedad-relativa>

Investigación Correlacional. Extraído el 10 de abril de 2016 de:

http://www.ecured.cu/Investigaci%C3%B3n_Correlacional

Javier Alberto Diez, Ciencias de la Tierra I de la Licenciatura en Tecnología Ambiental (2do cuatrimestre). Extraído el 14 de febrero de 2016 de:

www.exa.unicen.edu.ar/~jdiez/cstierra.php

Javier Sánchez San Román (2010). Evapotranspiración. Extraído el 18 de abril de 2016 de:

<http://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf>

Kelton, W; Law, A (1991): Simulation Modeling y Analisis. United States of America. McGRAW HILL.

Ley de Aguas (2007). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, número 38.595. Enero 2, 2007

Llamas, J. (1993): Hidrología General. Principios y Aplicaciones. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. Bilbao.

Marian Balestrini Acuña (Junio 2006). *Cómo se Elabora el Proyecto de Investigación.*

Martínez Muñoz, J. (2005). Percepción Remota “Fundamentos de Teledetección Espacial”. En línea, Extraído el 9 de febrero de 2016 de:

<http://siga.cna.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledetecci%C3%B3n%20espacial.PDF>

Metodología de la investigación, Marco Metodológico. Extraído el 29 de abril de 2016 de:

<https://bianneygiraldo77.wordpress.com/category/capitulo-iii/>

Ordoñez Gálvez, Juan Julio (2011). Cartilla Técnica: Balance Hídrico Superficial. Lima Perú. Extraído el 16 de abril de 2016 de:

http://www.gwp.org/Global/GWP-SAM_Files/Publicaciones/Varios/Balance_Hidrico.pdf

Philip B. Bedient, Wayne Charles Huber (2002), Hydrology and Floodplain Analysis. Prentice Hall

Prof Edilberto Guevara, (1990) Libro de Hidrología. (Capítulo 10)

Red Social Nacional. Radiación solar en el planeta tierra. Extraído el 19 de abril de 2016 de:

<http://www.rena.edu.ve/cuartaEtapa/cienciasTierra/Tema6.html>

Región Hidrográfica Centro Oriental. Extraído el 7 de febrero de 2016 de:

http://siga.geoportalsb.gob.ve/rios_embalses/vistas/pres_cuenca.php?id=6&titulo=Regi%C3%B3n%20Hidrogr%C3%A1fica%20Centro%20Oriental

Rodríguez José L. y González Dolores I. Caracas Enero 2001. Estudio ambiental de la cuenca del Río Unare y las lagunas de Unare y Píritu, Cuaderno CENAMB N°5.

Sistemas de Información Geográfica. Extraído el 4 de febrero de 2016 de:

<https://langleruben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/>

Surface Energy Balance Algorithms for Land. Advanced Training and Users Manual (August, 2002) Version 1.0

Tamayo y Tamayo M. (2003) Proceso de Investigación Científica

Velocidad del viento. Extraído el 18 de abril de 2016 de:

http://www.ecured.cu/Velocidad_del_viento

Worldwide Reference System. Extraído el 29 de abril de 2016 de:

<http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3231> y

http://landsat.usgs.gov/worldwide_reference_system_WRS.php