



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos  
Hidráulicos (ERIS)

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DURANTE LA SEQUÍA EN EL ESPEJO DE AGUA Y  
AFLORAMIENTO DE *EICHHORNIA CRASSIPES* EN LA LAGUNA DE OLOMEGA Y EL  
JOCOTAL MEDIANTE SENSORES REMOTOS, EL SALVADOR**

**Ing. Arturo Moisés Campos Hernández**

Asesorado por el M. Sc. Ing. Juan José Sandoval

Guatemala, julio de 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DURANTE LA SEQUÍA EN EL ESPEJO DE AGUA Y  
AFLORAMIENTO DE *EICHHORNIA CRASSIPES* EN LA LAGUNA DE OMEGA Y EL  
JOCOTAL MEDIANTE SENSORES REMOTOS, EL SALVADOR**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y  
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

**ING. ARTURO MOISÉS CAMPOS HERNÁNDEZ**

ASESORADO POR EL M.SC. ING. JUAN JOSÉ SANDOVAL

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE  
**MAESTRO (*MAGISTER SCIENTIFICAE*) EN CIENCIAS  
RECURSOS HIDRÁULICOS, OPCIÓN HIDROLOGÍA**

GUATEMALA, JULIO DE 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

|             |                                     |
|-------------|-------------------------------------|
| DECANO a.i. | Ing. José Francisco Gómez Rivera    |
| VOCAL II    | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez |
| VOCAL III   | Ing. José Milton de León Bran       |
| VOCAL IV    | Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente     |
| VOCAL V     | Br. Fernando José Paz González      |
| SECRETARIO  | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez     |

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

|             |  |
|-------------|--|
| DECANO a.i. | Ing. José Francisco Gómez Rivera           |
| EXAMINADOR  | M. Sc. Ing. Juan José Sandoval             |
| EXAMINADOR  | M. Sc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque |
| EXAMINADOR  | Ph. D. Ing. Luis Roberto Alfaro de Arcia   |
| SECRETARIO  | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez            |



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DURANTE LA SEQUÍA EN EL ESPEJO DE AGUA Y  
AFLORAMIENTO DE *EICHHORNIA CRASSIPES* EN LA LAGUNA DE OMEGA Y EL  
JOCOTAL MEDIANTE SENSORES REMOTOS, EL SALVADOR**

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha 12 de septiembre de 2022.

**Ing. Arturo Moisés Campos Hernández**

Correo: artucampos77@gmail.com

Carné No: 202290267







Guatemala, 14 de junio de 2023

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado  
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS):

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de asesor del estudiante abajo indicado y como coordinador de la maestría en ciencias en recursos hidráulicos, el informe final del **estudio especial** titulado:

**Evaluación del Impacto durante la sequía en el espejo de agua y afloramiento de Eichhornia crassipes en la laguna de Olomega y El Jocotal mediante sensores remotos, El Salvador**

Presentado por el estudiante, ingeniero:

**Arturo Moisés Campos Hernández**

Les manifiesto que el estudiante cumplió en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIS- y por la Universidad de San Carlos de Guatemala para la realización de su estudio.

Sin otro particular les agradezco la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,  
“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Juan José Sandoval

Coordinador maestría en ciencias en recursos hidráulicos





ERIS

ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA  
SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: M.Sc. Ingeniero Juan Carlos Fuentes Montepeque, Dr. Ingeniero Luis Roberto Alfaro de Arcia y M.Sc. Ingeniero Juan José Sandoval, así como el visto bueno del coordinador de la maestría en ciencias en recursos hidráulicos M.Sc Ingeniero Juan José Sandoval y la revisión lingüística realizada por la licenciada Jéssica Melgarejo Monterroso, colegiada No. 27003, al trabajo del estudiante ingeniero Arturo Moisés Campos Hernández, titulado: **Evaluación del impacto durante la sequía en el espejo de agua y afloramiento de Eichhornia crassipes en la laguna de Olomega y El Jocotal mediante sensores remotos, el Salvador;** en representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a diecisiete días del mes de julio de 2023.

**Imprímase**

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

  
M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis  
DIRECCION  
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERIA SANITARIA Y RECURSOS HIDRAULICOS  
FACULTAD DE INGENIERIA  
U.S.C.

**DIRECTOR**



## **ACTO QUE DEDICO A:**

|                    |  |
|--------------------|--|
| <b>Dios</b>        | Que ha estado conmigo en todos los momentos de mi vida                         |
| <b>Mis padres</b>  | Que con mucho amor han impulsado y orientado mi educación y formación          |
| <b>Mi hermana</b>  | Por su cariño incondicional y el apoyo y motivación que siempre me ha brindado |
| <b>Mis abuelos</b> | Por sus sabios consejos y oraciones que me acompañan siempre.                  |
| <b>Mi familia</b>  | Por su apoyo incondicional   |



## **AGRADECIMIENTO:**

**Servicio Alemán de  
Intercambio Académico  
(DAAD)**

Por permitirme realizar mis estudios de postgrados y cumplir una meta importante.

**Escuela Regional de  
Ingeniería Sanitaria y  
Recursos Hidráulicos  
(ERIS)**

Por su formación y su sabia enseñanza

**M.Sc. Ing. Juan José  
Sandoval**

Por su guía durante la maestría mediante sus conocimientos y consejos en lo académico y en lo profesional.

**Compañeros y amigos  
de la ERIS**

Con quienes hemos compartido gratos momentos de solidaridad en el transcurso de la maestría, especialmente a Rubén Medina, Elvis Calero y Jorge Velásquez, gracias por todo lo vivido en este camino





# ÍNDICE GENERAL

|  |       |
|--|-------|
| ÍNDICE GENERAL.....  | I     |
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....   | IV    |
| LISTA DE SÍMBOLOS.....   | VII   |
| GLOSARIO.....  | IX    |
| RESUMEN.....   | XIII  |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....                                      | XV    |
| JUSTIFICACIÓN.....   | XVII  |
| OBJETIVOS.....   | XIX   |
| HIPÓTESIS.....   | XXI   |
| ANTECEDENTES.....  | XXIII |
| ALCANCES Y LIMITACIONES.....   | XXX   |
| INTRODUCCIÓN.....  | XXXII |
| 1. MARCO TEÓRICO.....  | 1     |
| 1.1. Planta acuática invasora: <i>Eichhornia crassipes</i> .....     | 1     |
| 1.1.1. Familia/especie.....  | 1     |
| 1.1.2. Origen.....   | 1     |
| 1.1.3. Clasificación y descripción.....                              | 1     |
| 1.1.4. Hábitat.....  | 2     |
| 1.1.5. Estado de conservación.....                                   | 2     |
| 1.2. Sequía meteorológica.....                                       | 3     |
| 1.3. Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración..... | 4     |
| 1.3.1. Software RStudio.....   | 5     |
| 1.3.2. Datos meteorológicos: NASA POWER Data Access<br>Viewer.....   | 5     |
| 1.3.3. Evapotranspiración potencial: ecuación Hargreaves.....        | 5     |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.4.   | Sensores remotos .....  | 6  |
| 1.4.1. | Imágenes satelitales.....   | 6  |
| 1.4.2. | Landsat.....  | 7  |
| 1.5.   | Sistemas de información geográfica .....  | 7  |
| 1.6.   | Índice de vegetación de diferencia normalizado .....  | 8  |
| 2.     | METODOLOGÍA.....  | 10 |
| 2.1.   | Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración ....   | 10 |
| 2.1.1. | Recolección de datos meteorológicos.....  | 10 |
| 2.1.2. | Estimación de evapotranspiración potencial e índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración: Software RStudio ..... | 17 |
| 2.2.   | Índice de vegetación de diferencia normalizado .....  | 18 |
| 2.3.   | Matriz de transición de cobertura de <i>Eichhornia crassipes</i> y espejo de agua.....  | 19 |
| 3.     | RESULTADOS.....   | 22 |
| 3.1.   | Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración ....   | 22 |
| 3.1.1. | Evapotranspiración potencial .....  | 22 |
| 3.1.2. | Periodos de sequía seleccionados.....   | 25 |
| 3.2.   | Índice de vegetación de diferencia normalizado .....  | 25 |
| 3.3.   | Matriz de transición de cobertura de <i>Eichhornia crassipes</i> y espejo de agua.....  | 30 |
| 3.3.1. | Laguna de Olomega .....   | 30 |
| 3.3.2. | Laguna El Jocotal.....  | 32 |
|        | CONCLUSIONES.....   | 36 |
|        | RECOMENDACIONES .....   | 39 |
|        | REFERENCIAS .....   | 41 |
|        | APÉNDICES.....  | 44 |



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| 1. Proliferación <i>Eichhornia crassipes</i> en laguna El Jocotal .....               | 3  |
| 2. Proliferación y remoción de <i>Eichhornia crassipes</i> en laguna El Jocotal.....  | 3  |
| 3. Mapa de localización de laguna de Olomega.....                                     | 11 |
| 4. Mapa de localización de laguna El Jocotal.....                                     | 13 |
| 5. Precipitación mensual en laguna de Olomega y El Jocotal 2012-2021.....             | 15 |
| 6. Temperaturas máximas y mínimas mensuales en laguna de Olomega y el<br>Jocotal..... | 16 |
| 7. ETP en laguna de Olomega y El Jocotal 2012-2021 .....                              | 23 |
| 8. SPEI en laguna de Olomega y el Jocotal 2012-2021 .....                             | 24 |
| 9. NDVI en laguna de Olomega abril 2014.....  | 26 |
| 10. NDVI en laguna de Olomega, julio 2020 .....                                       | 27 |
| 11. NDVI en laguna El Jocotal, abril 2014.....  | 28 |
| 12. NDVI en laguna El Jocotal julio, 2020 .....                                       | 29 |
| 13. Gráfica de transición de cobertura en laguna de Olomega .....                     | 31 |
| 14. Gráfica de transición de cobertura en laguna el Jocotal .....                     | 34 |

## TABLAS

|   |       |
|---|-------|
| I. Sitio Ramsar humedal laguna de Olomega. ....                           | XXIV  |
| II. Sitio Ramsar humedal de área natural protegida laguna El Jocotal. ... | XXV   |
| III. Humedal laguna de Olomega. ....                                      | XXVI  |
| IV. Humedal laguna El Jocotal. ....                                       | XXVII |
| V. Ubicación de laguna de Olomega.....                                    | 10    |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| VI.   | Ubicación de laguna El Jocotal. ....                                 | 12 |
| VII.  | Matriz de transición de cobertura. ....                              | 19 |
| VIII. | Matriz de transición abril 2014 a julio 2020, Laguna de Olomega..... | 30 |
| IX.   | Matriz de transición abril 2014 a julio 2020, Laguna El Jocotal..... | 32 |



## LISTA DE SÍMBOLOS

| <b>Símbolo</b>               | <b>Significado</b>                          |
|------------------------------|---|
| <b>cm</b>                    | Centímetro                                  |
| <b><math>\delta T</math></b> | Diferencia de temperatura                   |
| <b><math>E_{rc}</math></b>   | Evapotranspiración potencial Hargreaves     |
| <b>°</b>                     | Grado                                       |
| <b>°C</b>                    | Grados Celsius                              |
| <b>ha</b>                    | Hectárea                                    |
| <b>R.</b>                    | Luz reflejada en el rango rojo del espectro |
| <b>m s. n. m.</b>            | Metros sobre el nivel del mar               |
| <b>mm</b>                    | Milímetro                                   |
| <b>'</b>                     | Minuto                                      |
| <b>N</b>                     | Norte                                       |
| <b>W</b>                     | Oeste                                       |
| <b>P.</b>                    | Precipitación mensual                       |
| <b><math>R_A</math></b>      | Radiación solar extraterrestre              |
| <b>”</b>                     | Segundo                                     |
| <b>S</b>                     | Sur   |
| <b>T.</b>                    | Temperatura                                 |
| <b>T<sub>máx.</sub></b>      | Temperatura máxima                          |
| <b>T<sub>min.</sub></b>      | Temperatura mínima                          |





## GLOSARIO

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| <b>Biomasa</b>                | Cantidad de productos o energía obtenida por la materia orgánica constitutiva de los seres vivos, sus excretas y sus restos no vivos, caracterizada por un bajo contenido de carbono y un elevado contenido de oxígeno. |
| <b>Ecosistema Prioritario</b> | Ecosistemas caracterizados por una distribución limitada, más susceptible a amenazas espaciales explícitas o a catástrofes.   |
| <b>ETP</b>                    | Evapotranspiración potencial  |
| <b>FMAM</b>                   | Fondo para el Medio Ambiente Mundial  |
| <b>HPII</b>                   | Humedales Protegidos de Importancia Internacional   |
| <b>Humedal</b>                | Terreno de aguas superficiales o subterráneas de poca profundidad.  |
| <b>Índice espectral</b>       | Pendiente de la emisión electromagnética de un cuerpo a una frecuencia dada o entre dos frecuencias cercanas.   |

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| <b>Infestación</b>             | Dicho de las plantas advenedizas: causar estragos y molestias.                                    |
| <b>Inflorescencia</b>          | Forma en que aparecen colocadas las flores en las plantas.  |
| <b>MARN</b>                    | Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales   |
| <b>Meteorología</b>            | Ciencia que estudia los meteoros o fenómenos atmosféricos   |
| <b>NASA POWER</b>              | National Aeronautics and Space Administration Prediction of Worldwide Energy Resources.           |
| <b>NDVI</b>                    | Índice de vegetación de diferencia normalizado  |
| <b>NIR</b>                     | Luz reflejada en el espectro del infrarrojo cercano   |
| <b>PAI</b>                     | Plantas acuáticas invasoras   |
| <b>PDSI</b>                    | Índice de severidad de sequía de Palmer   |
| <b>PNUD</b>                    | Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo  |
| <b>Sensor de teledetección</b> | Instrumento que transforma la radiación electromagnética en información perceptible y analizable. |

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>Shape</b>                | Formato de almacenamiento de datos vectoriales de Esri para almacenar la ubicación, forma y los atributos de las entidades geográficas.   |
| <b>SNET</b>                 | Servicio Nacional de Estudios Territoriales   |
| <b>SPEI</b>                 | Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración.   |
| <b>SPI</b>                  | Índice estandarizado de precipitación   |
| <b>UICN</b>                 | Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.  |
| <b>Vegetación emergente</b> | Plantas acuáticas arraigadas en cuerpos de agua temporal o de permanente inundado, cuyas partes o áreas sobresalen por encima del nivel del agua y no toleran inundaciones que cubra toda la planta entera o si lo toleran no florecen. |
| <b>Vegetación flotante</b>  | Plantas acuáticas, que flota, al menos en parte, en la superficie de agua.  |
| <b>Vegetación sumergida</b> | Plantas acuáticas que viven totalmente dentro del agua, de modo que su función en los estanques se reduce normalmente a aportar oxigenación.  |



## RESUMEN

El propósito de este estudio es evaluar el impacto durante la sequía en el espejo de agua y afloramiento de *Eichhornia crassipes* en la laguna de Olomega y El Jocotal mediante sensores remotos, El Salvador.

Para llevar a cabo el estudio se obtuvieron los datos de precipitación mensual, temperatura máxima mensual y temperatura mínima mensual a través del portal POWER NASA DAV, luego se analizaron los datos con el software RStudio, primero con el cálculo de la evapotranspiración con el uso de la ecuación de Hargreaves ya que el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI) solicita el uso de dicho método, y luego con el cálculo del SPEI por medio de la relación de la evapotranspiración con la precipitación para encontrar los periodos de sequía durante el año 2012 al 2021 en ambas lagunas.

Posteriormente, con el uso de imágenes satelitales tomadas de Landsat para los periodos de sequía seleccionados se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) con el fin de obtener las áreas cubiertas de espejo de agua y de *Eichhornia crassipes* para cada laguna. Finalmente, efectuado el cálculo de NDVI mediante la ayuda de los sistemas de información geográficos, se realizaron las diferentes matrices de transición para evaluar el impacto de la sequía en el afloramiento de *Eichhornia crassipes* y el espejo de agua.



## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La *Eichhornia crassipes* conocida comúnmente como jacinto de agua es una de las peores malezas acuáticas, tanto que ha sido incluida en el reporte de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) 100 de las especies exóticas invasoras más dañinas del mundo. Se expande rápidamente, siendo capaz de duplicar su biomasa hasta en 5 días en condiciones óptimas (altos niveles de nutrientes en el agua y temperatura alrededor de 27.5 °C) y degrada los sistemas ecológicos de ríos y embalses afectando la habilidad de las personas para utilizar los recursos hídricos.

A la fecha, cuatro de los siete humedales de importancia internacional (sitios Ramsar) del país se encuentran afectados por la presencia de *Eichhornia crassipes*. Estos son: laguna de Olomega, laguna El Jocotal, embalse Cerrón Grande y Complejo Guija.

Desde hace aproximadamente 10 años se han incrementado los esfuerzos para mitigar la proliferación de estas especies de plantas acuáticas invasoras (PAI), por lo que se han llevado a cabo acciones dirigidas a la extracción y la prevención de proliferaciones en varios sitios Ramsar. (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2019)

Sin embargo, en los diferentes planes actuales de gestión a nivel nacional, no se contempla el comportamiento que puede tener la *Eichhornia crassipes* en periodos de sequía al no haber estudios de ello, por esta razón se plantea la siguiente interrogante: ¿Existe una mayor proliferación de *Eichhornia crassipes* en periodos de sequía en las lagunas de Olomega y El Jocotal?





## JUSTIFICACIÓN

Las PAI son uno de los principales problemas en el manejo de humedales protegidos de importancia internacional (HPH) y otros cuerpos de agua. Las infestaciones de estas plantas ocasionan graves problemas ambientales, además de dificultar o imposibilitar la actividad humana en los humedales y zonas aledañas.

Las grandes cantidades de biomasa que producen estas plantas reduce la cantidad de luz que llega al interior del cuerpo de agua, y al descomponerse disminuyen los niveles de oxígeno disuelto, que puede ser fatal para la fauna acuática. Las densidades de PAI también constituyen un medio ideal para la proliferación de mosquitos, promoviendo la propagación de enfermedades.

En la última década el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) ha realizado una serie de esfuerzos por rescatar ecosistemas prioritarios como los humedales, uno de los mayores esfuerzos que ha realizado se enmarca en el control de especies invasoras, que propician la pérdida de estos ecosistemas. (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019)

A pesar de ello, existen pocos estudios para el análisis del comportamiento de PAI en periodos de sequías. Se espera que este estudio sea utilizado por alguna institución para realizar programas y estrategias ambientales más completas para reducir los problemas que generan las especies invasoras.



## OBJETIVOS

### General

Evaluar el impacto durante la sequía en el espejo de agua y afloramiento de *Eichhornia crassipes* en la laguna de Olomega y El Jocotal mediante sensores remotos, El Salvador.

### Específicos

1. Seleccionar los periodos de sequía a considerar durante el año 2012 a 2021, a través del cálculo del índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración.
2. Calcular el índice de vegetación de diferencia normalizado de las imágenes satelitales para los periodos de sequía seleccionados.
3. Realizar la matriz de transición del impacto durante la sequía en el afloramiento de *Eichhornia crassipes* y el espejo de agua.



## HIPÓTESIS

La proliferación de *Eichhornia crassipes* en la laguna de Olomega y El Jocotal aumenta más en periodos de sequía. Por lo que, el aumento en la proliferación de esta, supera en la laguna de Olomega las 460 ha de superficie cubierta registradas comúnmente y en la laguna El Jocotal las 155 ha.



## ANTECEDENTES

### Convención sobre los humedales (Ramsar)

La convención sobre los humedales conformada en Ramsar, Irán en 1971, es un tratado intergubernamental en el cual los países parte contraen compromisos para conservar las características ecológicas y procurar el desarrollo sostenible de sus humedales de importancia internacional. El 22 de mayo de 1999, El Salvador se convierte en país integrante de la convención. (Unidad de Humedales del MARN, 2011)

De acuerdo con el MARN (2018) el país cuenta con siete humedales reconocidos como de importancia internacional o sitios Ramsar que representan una superficie de 207,387 ha:

- Área natural protegida laguna El Jocotal (1999)
- Complejo bahía de Jiquilisco (2005)
- Embalse Cerrón Grande (2005)
- Laguna de Olomega (2010)
- Complejo Güija (2010)
- Complejo Jaltepeque (2011)
- Complejo Barra de Santiago (2014)

Como resumen en tablas I y II se presenta la ficha técnica del sitio Ramsar área natural protegida laguna El Jocotal, y sitio Ramsar humedal laguna de Olomega, ambas describen la ubicación, extensión, población y municipios que forman parte.

Tabla I. **Sitio Ramsar humedal laguna de Olomega**

|              |  |
|--------------|--|
| Sitio Ramsar | Declarado el 2 de febrero de 2010 con N° 1,899 en la lista de importancia internacional  |
| Ubicación    | Se ubica aproximadamente a 60 m s. n. m y la parte más alta de la cuenca se localiza a 765 m s. n. m.  |
| Extensión    | 7,556 ha   |
| Población    | 9,000 habitantes   |
| Municipios   | San Miguel, Chirilagua y El Carmen   |
| Descripción  | Se ubica aproximadamente a 60 m s. n. m. y la parte más alta de la cuenca se localiza a 765 m s. n. m.<br>Es el cuerpo de agua dulce más grande la región oriental de El Salvador.<br>Tiene una laguna principal, pantanos herbáceos, bosque tropical seco saturado y zonas de actividades agropecuarias.<br>Existen muchas especies amenazadas y en peligro de extinción. |

Fuente: Elaboración propia, con base en el Catálogo de mapas de zonas críticas prioritarias en humedales Ramsar de El Salvador.

La proliferación de *Eichhornia crassipes* que limita la pesca, navegación y afecta la calidad del agua es una situación extrema. De igual forma la quema y tala ilegal en la zona norte y sureste dañan el humedal, al generar erosión y pérdida de biodiversidad. Las colonias permanentes de “pato ancho” pueden estar causando reducción en los rendimientos pesqueros. (Unidad de Humedales del MARN 2011)



Tabla II. **Sitio Ramsar humedal de área natural protegida laguna El Jocotal**

|              |  |
|--------------|--|
| Sitio Ramsar | Declarado en 1999 con N° 970 en la lista de importancia internacional  |
| Ubicación    | 30 m s. n. m.  |
| Extensión    | 1,571 ha   |
| Población    | 10,500 habitantes  |
| Municipios   | El Tránsito, San Miguel y Jucuarán   |
| Descripción  | Es un área natural protegida.<br>Consta de laguna permanente con profundidad de unos tres metros.<br>La mayoría de la laguna está cubierta principalmente de vegetación acuática jacinto de agua ( <i>Eichhornia crassipes</i> ).<br>La parte norte se ubica en la base del volcán Chaparrastique en San Miguel y esta zona es rica en sales (conductividad alta). |

---

Fuente: Elaboración propia, con base en el Catálogo de mapas de zonas críticas prioritarias en humedales Ramsar de El Salvador.

Los aspectos críticos de este humedal están determinados por la presencia de *Eichhornia crassipes* e inundaciones durante la época lluviosa, situación que incide en el azolvamiento del área, bajo niveles de oxígeno en el agua, arrastre de desechos sólidos y manejo hidráulico complejo. (Unidad de Humedales del MARN, 2011)

## Inventario nacional de humedales de El Salvador

Las fichas técnicas del humedal laguna de Olomega y El Jocotal fueron realizadas bajo el *Proyecto de conservación, uso sostenible de biodiversidad y mantenimiento de servicios del ecosistema en humedales protegidos de Importancia Internacional* por el Fondo de Medio Ambiente Mundial (FMAM) y el MARN, y se muestran en tablas III y IV.

Tabla III. **Humedal laguna de Olomega**

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| Humedal nacional            | Declarado humedal nacional, pero sin decreto legislativo de protección   |
| Extensión en época seca     | 2,422 ha   |
| Extensión en época lluviosa | 2,597 ha   |
| Vegetación                  | Lechuga de agua ( <i>Pistia stratioides</i> )<br>Lenteja de agua ( <i>Lemna sp.</i> )<br>Dormilona de agua ( <i>Neptunia prostrata</i> )<br>Duraznillo de agua ( <i>Jussiaea repens</i> hoy <i>Ludwigia peploides</i> )<br>Campanilla ( <i>Ipomaea cornea</i> )<br>Alga cola de zorro ( <i>Ceratophyllum demersum</i> )<br>Carrizo ( <i>Phragmites comunis</i> )<br>Cola de pato ( <i>Sagitaria lancifolia</i> )<br>Alga barbona ( <i>Hydrilla verticillata</i> )<br>Platanillo ( <i>Heliconia spp.</i> )<br>Jacinto de agua ( <i>Eichhornia crassipes</i> ) |

Fuente: elaboración propia, con base en el Inventario nacional de humedales, El Salvador de Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

La laguna de Olomega es el cuarto cuerpo natural de agua dulce más grande del país y, dado que se encuentra en una extensa planicie de casi igual elevación, al espejo de agua principal se suma un área inundada de casi la misma extensión, que persiste durante la mayor parte de la época lluviosa. Es aquí, en donde aledaño al extremo norte del cuerpo principal de agua, se encuentra un bosque y pantanos inundables que se extienden hacia el nor-noreste. (MARN, 2018)

Tabla IV. **Humedal laguna El Jocotal**

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Humedal nacional            | Por decreto legislativo de protección desde 1986  |
| Extensión en época seca     | 296 ha  |
| Extensión en época lluviosa | 723 ha  |
| Vegetación emergente        | Tules ( <i>Phragmites australis</i> y <i>Typha dominguensis</i> )<br>Las ninfas ( <i>Nymphaea ampla</i> y <i>Nymphoides indica</i> )<br>La trista ( <i>Eleocharis elegans</i> )<br>El molinillo ( <i>Cyperys adorum</i> ) |
| Vegetación flotante         | Jacinto de agua ( <i>Eichhornia crassipes</i> )<br>Lechuga de agua ( <i>Pistia stratioides</i> )<br>Oreja de ratón ( <i>Salvinia auriculata</i> )<br>Lentejuela de agua ( <i>Lemna aequinoctialis</i> )                   |
| Vegetación sumergida        | La atrapa moscas ( <i>Utricularia foliosa</i> )<br>Tomillo de agua del viejo mundo ( <i>Hydrila verticillata</i> )  |

Fuente: Elaboración propia, con base en el Inventario nacional de humedales, El Salvador de Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

La laguna El Jocotal es una de las primeras áreas naturales identificadas en el país, a principios de la década de 1970; catalogado en ese entonces y hasta hace relativamente pocos años como refugio de vida silvestre. Es la única en contar con un decreto legislativo de protección (que data de 1986); mientras que todas las restantes áreas protegidas del país cuentan con decretos ejecutivos. (MARN, 2018)



## ALCANCES Y LIMITACIONES

- Alcances

La investigación se enfoca en evaluar el impacto durante la sequía en el espejo de agua y afloramiento de *Eichhornia crassipes* en la laguna de Olomega y El Jocotal mediante sensores remotos.

- Limitaciones

No hay disponibilidad de datos históricos de precipitación mensual, temperatura máxima mensual y temperatura mínima mensual, por parte del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET).

No existen estudios previos de las lagunas de Olomega y El Jocotal en los que se evalúe el impacto de la sequía en el espejo de agua y afloramiento de *Eichhornia crassipes* mediante sensores remotos.



## INTRODUCCIÓN

La proliferación de *Eichhornia crassipes* es un problema que tienen diferentes cuerpos de agua, la cual afecta de gran manera a la población que utiliza el recurso hídrico como medio de vida, además, la sequía es otro factor determinante que abona más a la problemática de la crisis hídrica en la población.

Debido a las variables meteorológicas que suceden, se han ido implementando diferentes análisis y modelos con la ayuda de diferente software, donde se pueden evaluar diversos escenarios para encontrar mejores soluciones y considerar los resultados obtenidos en los planes de gestión, tales como el NDVI a través del software RStudio, para el análisis de sequías.

El SPEI ha sido utilizado para monitorear la sequía con el uso de análisis estadísticos, se obtienen los periodos puntuales de inicio y fin de sequía y estos resultados pueden ser utilizados para un análisis más profundo con sensores remotos.

El NDVI permite determinar las condiciones vegetativas, su dinámica y el aspecto de las masas de agua mediante imágenes satelitales, por lo que es posible evaluar cómo se comportan en periodos de sequía.

Al observar los patrones de ambos índices se puede evaluar mediante una matriz de transición el impacto de la sequía en el espejo de agua y en el afloramiento de *Eichhornia crassipes*.







# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Planta acuática invasora: *Eichhornia crassipes*

A continuación, se presenta una definición de la *Eichhornia crassipes*, familia especie y origen.

### 1.1.1. Familia/especie

La *Eichhornia crassipes*: conocida como jacinto de agua ninfa, lirio acuático, flor de bora, camalote, aguapey y lechuguín.

### 1.1.2. Origen

Exótica, cuenca del Amazonas en Brasil, introducida en Estados Unidos, México, Centroamérica y las Antillas, así como en regiones tropicales de África, India, sur de Asia, Indonesia y Australia.

### 1.1.3. Clasificación y descripción

Tallo vegetativo sumamente corto; hojas en rosetas, ascendentes a extendidas, peciolo cortos, hinchados (bulbosos), con tejido parenquimatoso; con dimorfismo foliar al crecer agrupadas: hojas puramente ascendentes y peciolo elongados y menos hinchados; láminas de 2 a 16 cm.

Inflorescencia: espiga; flores moradas, y una mancha amarilla en el lóbulo superior del perianto; fruto: cápsula de 1.5 cm. La *Eichhornia crassipes* se cultiva

en estanques y fuentes; es la única especie de su género estrictamente flotante. Está incluido en la lista de 100 de las especies exóticas invasoras más dañinas del mundo de la UICN.

#### **1.1.4. Hábitat**

Habita en cuerpos de agua dulce como lo son: ríos, lagos, charcas y embalses de los trópicos y subtropicos localizados a latitudes no mayores de 40 °N y 45 °S. Temperaturas menores de 0 °C afectan su crecimiento al igual que la alta salinidad. Sin embargo, cuerpos de agua eutrofizados que contienen niveles altos de nitrógeno, fósforo, potasio al igual que aguas contaminadas con metales pesados como cobre y plomo no limitan su crecimiento ya que puede anclarse y enraizar en suelos saturados de agua por un corto periodo.

#### **1.1.5. Estado de conservación**

Ampliamente extendido en países tropicales y subtropicales. Generalmente considerado una plaga, y está incluido en la lista 100 de las especies exóticas invasoras más dañinas del mundo de la UICN. (MARN, 2019)

El MARN ha tenido como objetivo conservar la vida acuática y llevar un mayor desarrollo a los habitantes de las comunidades aledañas, sin embargo, la proliferación les afecta para trabajos de pesca artesanal y turismo (figura 1).

Con la colaboración del FMAM y administrado financieramente por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) ha realizado trabajos de extracción como se muestra en figura 2.

Figura 1. Proliferación *Eichhornia crassipes* en laguna El Jocotal



Fuente: [Fotografía de Lucinda Quintanilla]. (El Salvador.2017). El Salvador histórico. El Salvador.

Figura 2. Proliferación y remoción de *Eichhornia crassipes* en laguna El Jocotal



Fuente: [Fotografía de Lucinda Quintanilla]. (El Salvador.2017). El Salvador histórico. El Salvador.

## 1.2. Sequía meteorológica

La definición de sequía meteorológica está vinculada a una región específica, pues las condiciones atmosféricas que generan un déficit en las precipitaciones son muy variables de una región a otra. Además, este tipo de sequía también puede implicar temperaturas más altas, vientos de fuerte intensidad, humedad relativa baja, incremento de la evapotranspiración, menor

cobertura de nubes y mayor insolación; todos estos factores pueden incidir finalmente en una reducción de las tasas de infiltración de la lluvia, mayor escorrentía, reducción en la percolación profunda y menor recarga de las aguas subterráneas. En muchos casos el indicador primario de disponibilidad de agua es la precipitación. (Lemus, Araujo y Guevara, 2017)

Las sequías son fenómenos naturales que pueden ocurrir tanto en zonas de altas precipitaciones como en lugares donde la precipitación es baja. (Mishra y Singh, 2010)

La sequía meteorológica es conocida como la condición climática en la que las lluvias acumuladas en un determinado lugar están significativamente por debajo de lo normal. (Magaña, Mendez, Neri y Vázquez, 2018)

### **1.3. Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración**

El SPEI cumple con los requisitos de un índice de sequía ya que su carácter multiescalar le permite ser utilizado por diferentes disciplinas científicas para detectar, monitorear y analizar sequías.

El SPEI se basa en el procedimiento original de cálculo del SPI. El SPI se calcula utilizando precipitación mensual (o semanal) como datos de entrada. El SPEI utiliza la diferencia mensual (o semanal) entre la precipitación y la ETP. Esto representa un simple balance hídrico climático que se calcula en diferentes escalas de tiempo para obtener el SPEI. Existen varias ecuaciones para modelar ETP basadas en datos disponibles, por ejemplo, la ecuación de Thornthwaite, la ecuación de Penman-Monteith, la ecuación de Hargreaves, entre otros, por lo que el SPEI no está vinculado a ninguna en particular. (Beguería , Latorre , Reig, y Vicente, 2012)

### **1.3.1. Software RStudio**

Es un entorno de desarrollo integrado para el lenguaje de programación R, dedicado a la computación estadística y gráficos. A través de él pueden ser analizados diferentes datos meteorológicos para obtener diferentes índices, como el sc-PDSI, SPI, y el SPEI, este último puede medir la gravedad de la sequía de acuerdo con su intensidad y duración, puede identificar el inicio y el final de los episodios de sequía.

### **1.3.2. Datos meteorológicos: NASA POWER Data Access Viewer**

El programa NASA POWER DAV fue desarrollado para la generación de datos meteorológicos y su uso en diferentes proyectos e investigaciones.

Es una de las bases de datos meteorológicas disponibles más utilizadas debido a su actualización frecuente y a la disponibilidad de datos pudiendo acceder de forma inmediata y automática a través del portal web oficial.

A través del portal de NASA POWER DAV se pueden extraer diferentes variables meteorológicas, tales como: temperatura máxima del aire, temperatura mínima del aire, temperatura media del aire, humedad relativa, velocidad del viento media, radiación extraterrestre, radiación solar, entre otros. Estos datos son de cobertura mundial disponibles desde 1981 a la fecha.

### **1.3.3. Evapotranspiración potencial: ecuación Hargreaves**

La ecuación de Hargreaves es un método basado en la temperatura y aunque da una expresión para la evapotranspiración del cultivo de referencia, se

utiliza como expresión para la evapotranspiración potencial. Tiene un vínculo con la radiación solar. (Hargreaves y Samani, 1985)

$$E_{rc} = 0.0022 * R_A * \delta'T^{0.5} * (T + 17.8)$$

Donde:

$E_{rc}$  = Evapotranspiración potencial. (mm/mes)

$R_A$  = Radiación solar extraterrestre. (MJ/m<sup>2</sup>/mes)

$\delta'T$  = Diferencia de temperatura. (°C)

T = Temperatura promedio del aire. (°C)

#### **1.4. Sensores remotos**

Los sensores remotos son una herramienta de gran utilidad en los estudios ambientales relacionados con suelos, vegetación, litología, geomorfología, entre otros. (Carpintero, Chica, Rigol, Iguzquiza y Galiano, 2007)

A partir de determinadas bandas espectrales se obtiene la extracción de información de imágenes satelitales, así mediante análisis digital se podrá realizar cálculos como por ejemplo de índices espectrales para diferentes análisis de interés. (Delpino, Portillo, y Mora, 2018)

##### **1.4.1. Imágenes satelitales**

Las imágenes satelitales son el tipo de información que es proporcionada por algún sensor de cierto satélite y son herramienta útil para evaluación y monitoreo ambiental. Hoy en día son una herramienta utilizada para la identificación y monitoreo de elementos de la superficie terrestre y su dinámica en periodos de tiempo determinados. Asimismo, estas proporcionan información para determinar los factores del cambio en coberturas terrestres. (De La Cruz y Muñoz, 2016)



Las imágenes satelitales están formadas por matrices, en la cual cada celda corresponde a un píxel y mediante la resolución espacial del sensor dará las dimensiones. La radiación electromagnética proveniente de las diferentes coberturas es registrada por los sensores y almacenada en cada píxel, conforme a los intervalos de longitudes de onda, en las que este programado el sensor para captar. (Bravo, 2017)

#### **1.4.2. Landsat**

El conjunto de satélites Landsat fue el primer programa creado específicamente para la detección remota, como líder para el estudio de características ambientales de la tierra, monitoreo de cobertura y usos de suelo, este satélite se encuentra en monitoreo por más de 40 años, proporcionando datos temporales e imágenes multiespectrales con alta resolución espacial. Las imágenes Landsat brindan información a diversos estudios, supliendo diversas necesidades de los negocios, ciencia, educación, gobierno y seguridad nacional. (Zanter, 2016)

#### **1.5. Sistemas de información geográfica**

Los sistemas de información geográfica son la unión tanto de hardware, software y datos geográficos creados para la captura de diferentes funciones de almacenamiento, manipulación, análisis y el desarrollo de toda la información referenciada, posibilitando la vinculación espacial de distintas fuentes de información. Además, los sistemas de información geográfica trabajan con bases de datos que relaciona identificadores de objetos gráficos de un mapa digital, de esta manera permite conocer su localización en la cartografía de un objeto con sus atributos que indica la información del identificador de la base de datos. (Guevara, 2016)

Además, mediante técnicas de datos referenciados geográficamente o geoprocesamiento se puede georreferenciar la información de cada área, lo que permite simbolizar cartográficamente la variación espacial y/o temporal de las variables, además se puede integrar espacialmente la información procedente de diferentes fuentes. (Fandos *et al.*, 2019)

## 1.6. Índice de vegetación de diferencia normalizado

Es un índice espectral de vegetación adquirido a través de imágenes satelitales derivadas de la teleobservación en los segmentos rojo e infrarrojo cercano del espectro. Esta expresado por la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde:

NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizado

NIR = Luz reflejada en el espectro del infrarrojo cercano (Near infraRed)

R = Luz reflejada en el rango rojo del espectro (Red)

NDVI, es el índice de vegetación cuyo resultado oscila entre -1 y 1, cuyos valores menores de 0 se interpretan como suelos desnudos o cuerpos de agua, mayores a estos valores van en relación equivalente a la cobertura vegetal, entre más alto los valores, indican la actividad fotosintética de las diversas coberturas. (Kundu, Denis, Patel, y Dutta, 2017)



## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración

Para tener claro el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración, se presenta a continuación la recolección de datos meteorológicos.

#### 2.1.1. Recolección de datos meteorológicos

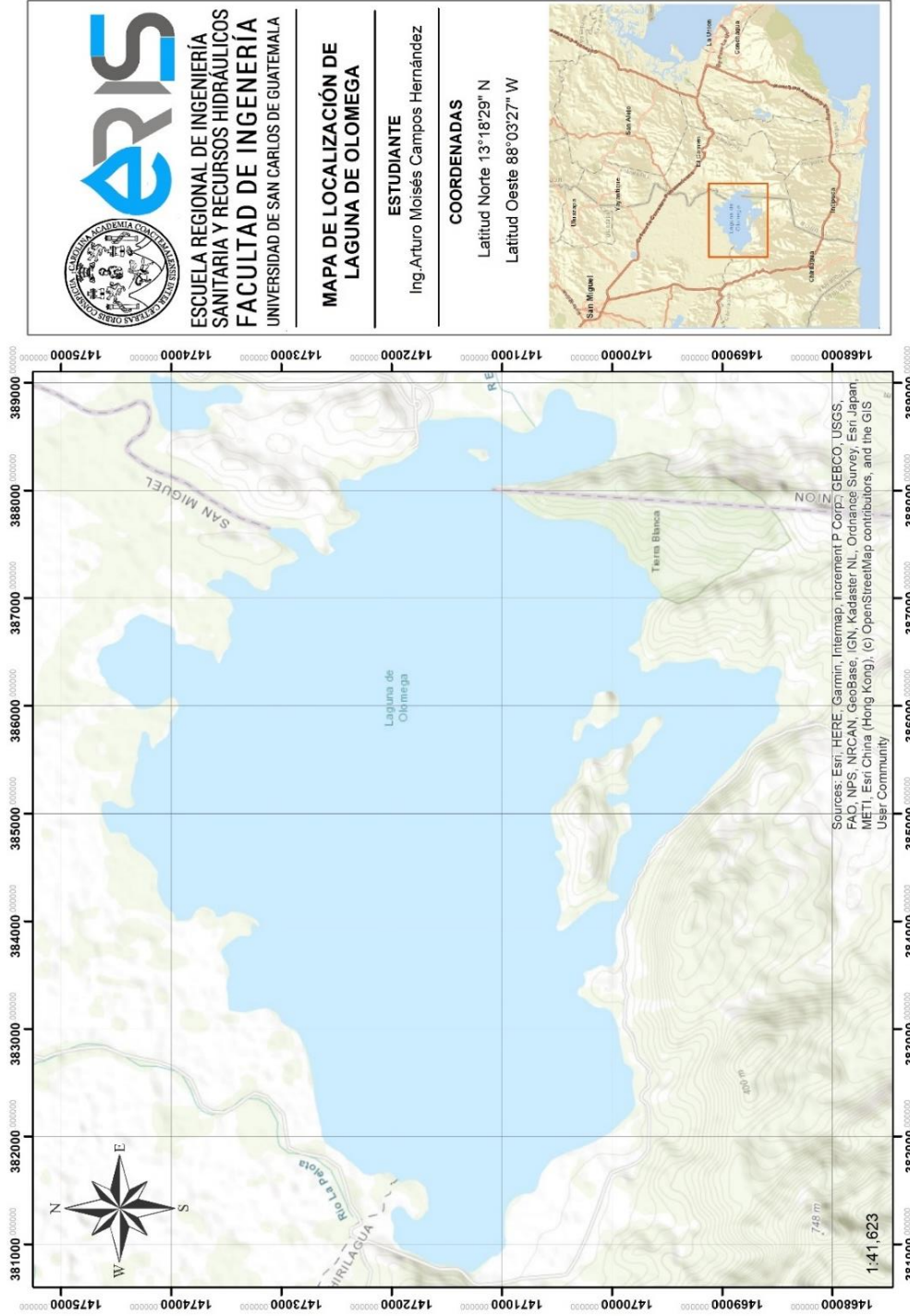
Las ubicaciones según ficha informativa Ramsar y Geo portal del Centro Nacional de Registros (CNR) para la recolección de datos de ambas lagunas se describen brevemente en tablas V y VI, además, las figuras 3 y 4 exponen los mapas de localización para estas.



Tabla V. **Ubicación de laguna de Olomega**

|   |   |
|---|---|
| Latitud norte                           | 13°18'29" N   |
| Longitud oeste                          | 88°03'27" W   |
| Región administrativa                   | Región oriental de El Salvador  |
| Ciudad y centro poblacional más cercano | Municipio de San Miguel y Chirigua, departamento de San Miguel, y municipio El Carmen, departamento de La Unión         |
| Descripción de los límites              | En el sector noroeste, colinda con el río Grande de San Miguel, al sur con los acantilados de la cordillera de Jucuarán |
| Extensión                               | 2,475 ha  |

Fuente: elaboración propia, con base en Geoportal CNR del Centro Nacional de Registro de El Salvador.

Figura 3. Mapa de localización de laguna de Olomega



|  |  |
|--|--|
|  <p><b>ERIS</b><br/>ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA<br/>SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS<br/>FACULTAD DE INGENIERIA<br/>UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA</p> | <p><b>MAPA DE LOCALIZACIÓN DE<br/>LAGUNA DE OLOMEGA</b></p>      |
|  | <p><b>ESTUDIANTE</b><br/>Ing. Arturo Moisés Campos Hernández</p> |
| <p><b>COORDENADAS</b><br/>Latitud Norte 13°18'29" N<br/>Latitud Oeste 88°03'27" W</p>  |  |
|    |  |

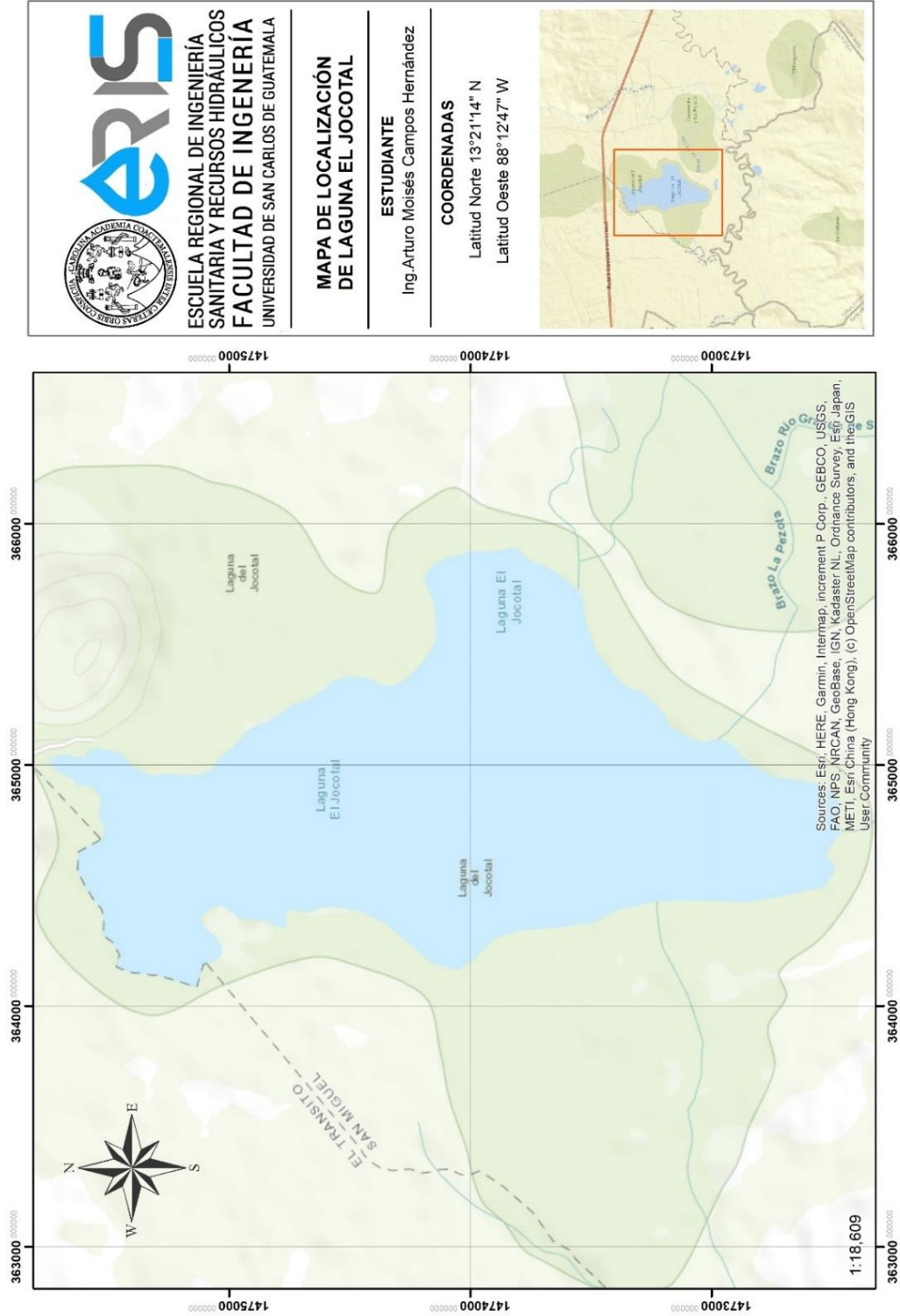
Fuente: Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.



Tabla VI. **Ubicación de laguna El Jocotal**

|   |  |
|---|--|
| Latitud norte                           | 13°21'14" N  |
| Longitud oeste                          | 88°12'47" W  |
| Región administrativa                   | Región oriental de El Salvador   |
| Ciudad y centro poblacional más cercano | Municipio El Tránsito, departamento de San Miguel  |
| Descripción de los límites              | En el sector norte se encuentran las lavas del volcán Chaparrastique, en el oeste existe un drenaje regulado mediante niveles artesanales que confluye con el río Grande de San Miguel, al sur del cuerpo de agua existe un complejo lagunar estacional compuesto por las lagunetas Agua Caliente, Los Piches, San Juan, colindando con las orillas de la sierra de Jucuarán. En el este colinda con zonas de inundación utilizadas en época lluviosa para riego |
| Extensión                               | 342 ha   |

Fuente: elaboración propia, con base en Geoportal CNR del Centro Nacional de Registro de El Salvador.

Figura 4. Mapa de localización de laguna El Jocotal



|  |  |
|--|--|
|  <p><b>ERIS</b><br/>ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA<br/>SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS<br/>FACULTAD DE INGENIERIA<br/>UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA</p> | <p><b>MAPA DE LOCALIZACIÓN<br/>DE LAGUNA EL JOCOTAL</b></p>                        |
|  | <p><b>ESTUDIANTE</b><br/>Ing. Arturo Moisés Campos Hernández</p>                   |
| <p><b>COORDENADAS</b><br/>Latitud Norte 13°21'14" N<br/>Latitud Oeste 88°12'47" W</p>  |  |

Fuente: Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Las diferentes precipitaciones mensuales en ambas lagunas, a lo largo del periodo 2012 – 2021 fueron muy variadas como se muestra en gráfica de figura 5, los datos meteorológicos que componen la gráfica se pueden observar en los apéndices 1 al 6 ordenados por mes y año, donde también se encuentran los datos de temperaturas máximas y mínimas, los cuales se exponen en la gráfica de la figura 6.

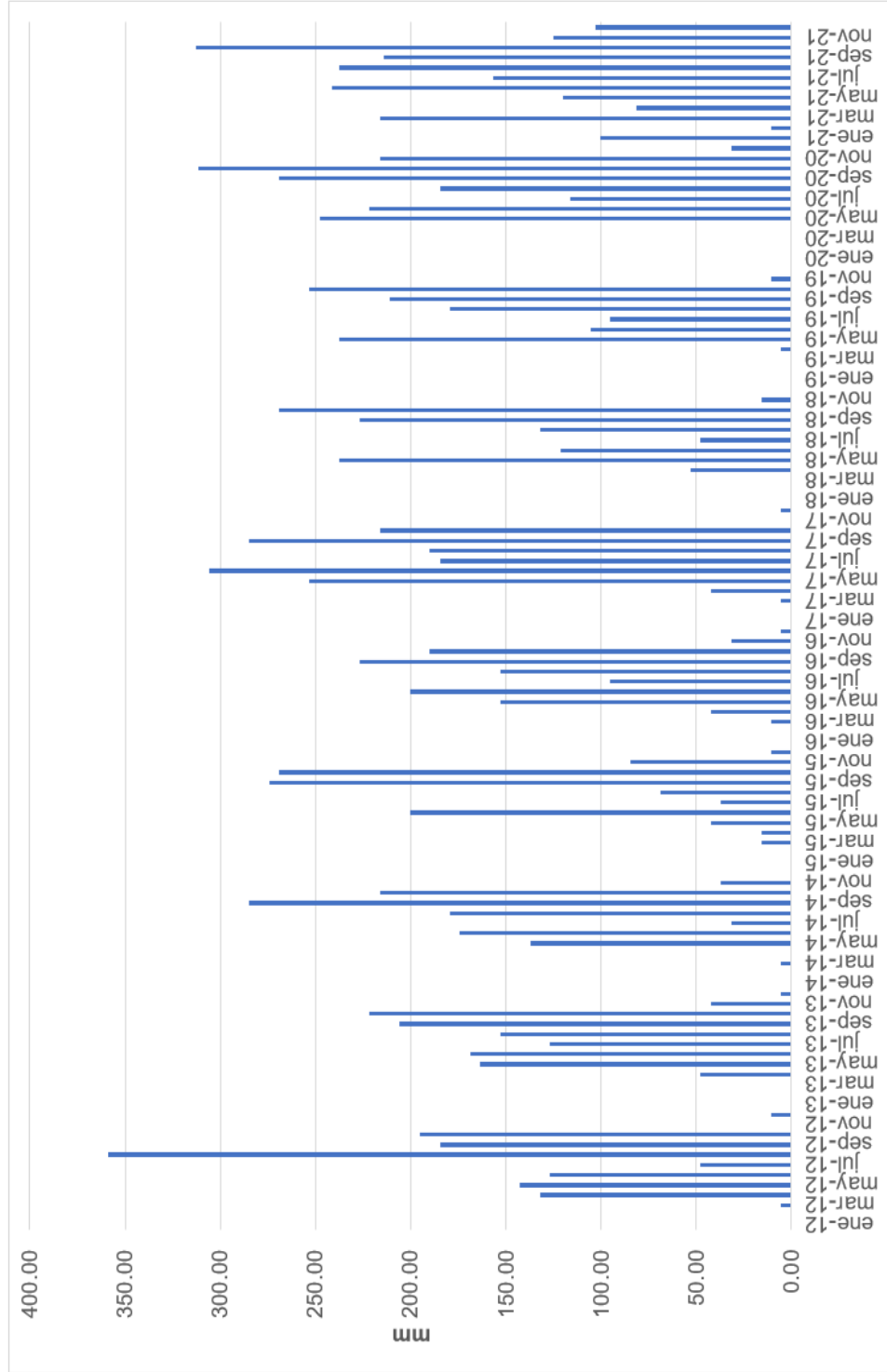
Los datos meteorológicos descargados del portal NASA POWER DAV fueron obtenidos en formato csv para uso, posteriormente fueron ordenados para su mayor comprensión como se demuestra en los apéndices. Finalmente, los datos fueron ploteados en gráficas con ayuda del programa Microsoft Excel para una mejor visualización.

Para ambas lagunas se utilizaron los mismos datos meteorológicos, debido a que el portal NASA POWER DAV determinó los mismos resultados de precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales al ser lagunas cercanas.

Los datos ploteados fueron de importancia para la determinar los periodos de sequía con el uso del software RStudio a través de la extensión SPEI.

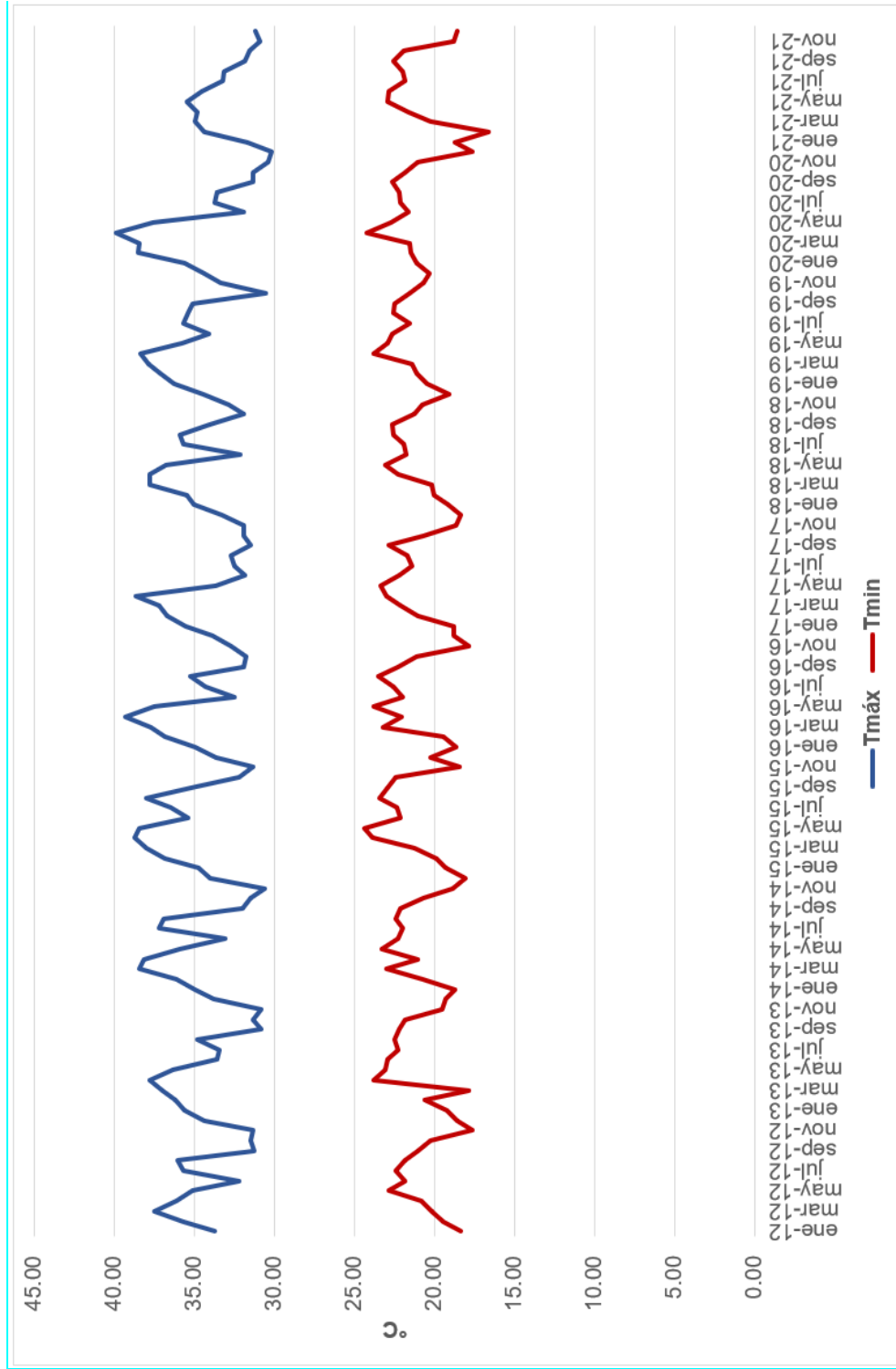


Figura 5. Precipitación mensual en laguna de Olomega y El Jocotal 2012-2021



Fuente: Nasa Aeronautics and Space Administration, (2022) NASA POWER Data Access Viewer.

Figura 6. Temperaturas máximas y mínimas mensuales en laguna de Olomega y el Jocotal



Fuente: Nasa Aeronautics and Space Administration, (2022) NASA POWER Data Access Viewer.

### **2.1.2. Estimación de evapotranspiración potencial e índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración: Software RStudio**

Los datos meteorológicos se analizaron en el software RStudio, con el uso del paquete SPEI, para la obtención de índices de sequía en ambas lagunas. El SPEI arroja un valor negativo cuando existe sequía y un valor positivo cuando no la existe.

Se realizó el cálculo de la ETP para cada mes a través del software, la ecuación utilizada para el cálculo de ETP fue Hargreaves debido al acceso de los datos de entrada que solicita el software (temperatura máxima, temperatura mínima y latitud), además de ser la ecuación propuesta en el paquete SPEI; dicha ecuación fue rectificada en la actualización del paquete SPEI de enero del 2023 en su versión 1.8.0 para el software RStudio.

Los resultados del cálculo de ETP se emplearon en el SPEI, con la relación de la precipitación mensual acumulada para los años de estudio, teniendo el SPEI de cada mes durante los años del 2012 al 2021.

Posteriormente al obtener los valores SPEI de cada mes se pudo saber cuáles eran los meses de sequía, por lo que fueron seleccionados para someterse a estudio de NDVI los meses que obtuvieron un valor SPEI negativo, siendo los valores positivos descartados al no evaluar en esta investigación el comportamiento de la *Eichhornia crassipes* en periodos sin sequía.

## 2.2. Índice de vegetación de diferencia normalizado

Se estimó la cobertura de *Eichhornia crassipes* al ser la única especie dentro de la extensión de las lagunas según el *Protocolo para el control de jacinto de agua y otras plantas acuáticas invasoras en El Salvador* y el *Catálogo de mapas de zonas críticas prioritarias en humedales Ramsar de El Salvador* realizado en el Plan nacional de mejoramiento de humedales en El Salvador por parte del MARN.

La extensión fue tomada a partir de shapes proporcionados por el GEOPORTAL CNR del Centro Nacional de Registro de El Salvador, en el que indican las zonificaciones límites registradas.

Para analizar la cobertura de *Eichhornia crassipes* y el espejo de agua se utilizó el portal del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) siendo esta una agencia científica del Gobierno Federal de Estados Unidos que proporciona imágenes satelitales de alta resolución a través del satélite Landsat 8 que registra datos a partir del año 2013. Dentro del portal USGS se seleccionó el área geográfica donde se encuentra la laguna de Olomega y El Jocotal, el rango temporal abarcó todos los meses que fueron identificados con índices de sequía del año 2012-2021.

Se colocó un filtro para identificar imágenes satelitales con menos del 10 % de nubosidad, posteriormente se seleccionó el conjunto de datos de Landsat Collection 2 – Level – 1 que componen al Landsat 8 – 9 OLI/TIRS C2 L1. Se descargaron un total de 14 elementos para cada mes, de los cuales 11 elementos eran archivos TIF correspondiente a las 11 bandas registradas, 1 elemento MTL, 1 elemento QA y 1 elemento SAA.

Las bandas utilizadas fueron la 4 y 5 a partir de la siguiente operación:

$$NDVI = \frac{\text{Banda 5} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 5} + \text{Banda 4}}$$

El contraste de las bandas se realizó en el software ArcGIS 10.8 con el uso de los shapes proporcionados por el GEOPORTAL CNR, posteriormente con la ayuda de la tabla de atributos y la calculadora de campo del software se determinó el área cubierta por *Eichhornia crassipes* y por el espejo de agua, siendo los valores menores de 0 el espejo de agua, y los valores mayores de 0 la *Eichhornia crassipes*.

### 2.3. Matriz de transición de cobertura de *Eichhornia crassipes* y espejo de agua

Para definir la cobertura de cambio de *Eichhornia crassipes* y espejo de agua, se elaboró una matriz de transición entre los periodos identificados con sequía mediante el software ArcGIS 10.8, la cual presenta los resultados en hectáreas. Esta se explica a continuación a través de la tabla VII, en la cuarta columna con fondo celeste tenemos la cobertura total que corresponde a la fecha menos reciente. En la cuarta fila con fondo verde tenemos la cobertura total que corresponde a la fecha más reciente, la matriz con los resultados de cada laguna se observa en tablas VIII y IX.

Tabla VII. Matriz de transición de cobertura

| Matriz de transición        | Espejo de agua | <i>Eichhornia crassipes</i> | Total |
|-----------------------------|----------------|-----------------------------|-------|
| <i>Espejo de agua</i>       |                |                             |       |
| <i>Eichhornia crassipes</i> |                |                             |       |
| <b>Total</b>                |                |                             |       |

Fuente: elaboración propia.

Al obtener del cálculo de NDVI los shapes de *Eichhornia crassipes*, se aplicó la herramienta Intersect en el software ArcGIS 10.8, permitiendo combinar los shapes de la fecha menos reciente y más reciente calculando el valor de cobertura de *Eichhornia crassipes* que no sufrió alteración entre ambas fechas a través de un nuevo shape.

Posteriormente se cuantificó el área en hectáreas del nuevo shape, de tal manera que los valores que se mantuvieron o donde no existió algún cambio son los valores en fondo amarillo, mientras que los valores con fondo blanco indican el cambio generado en la cobertura de espejo de agua y de *Eichhornia crassipes*.



### **3. RESULTADOS**

#### **3.1. Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración**

Para comprender el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración es importante tomar en cuenta lo siguiente.

##### **3.1.1. Evapotranspiración potencial**

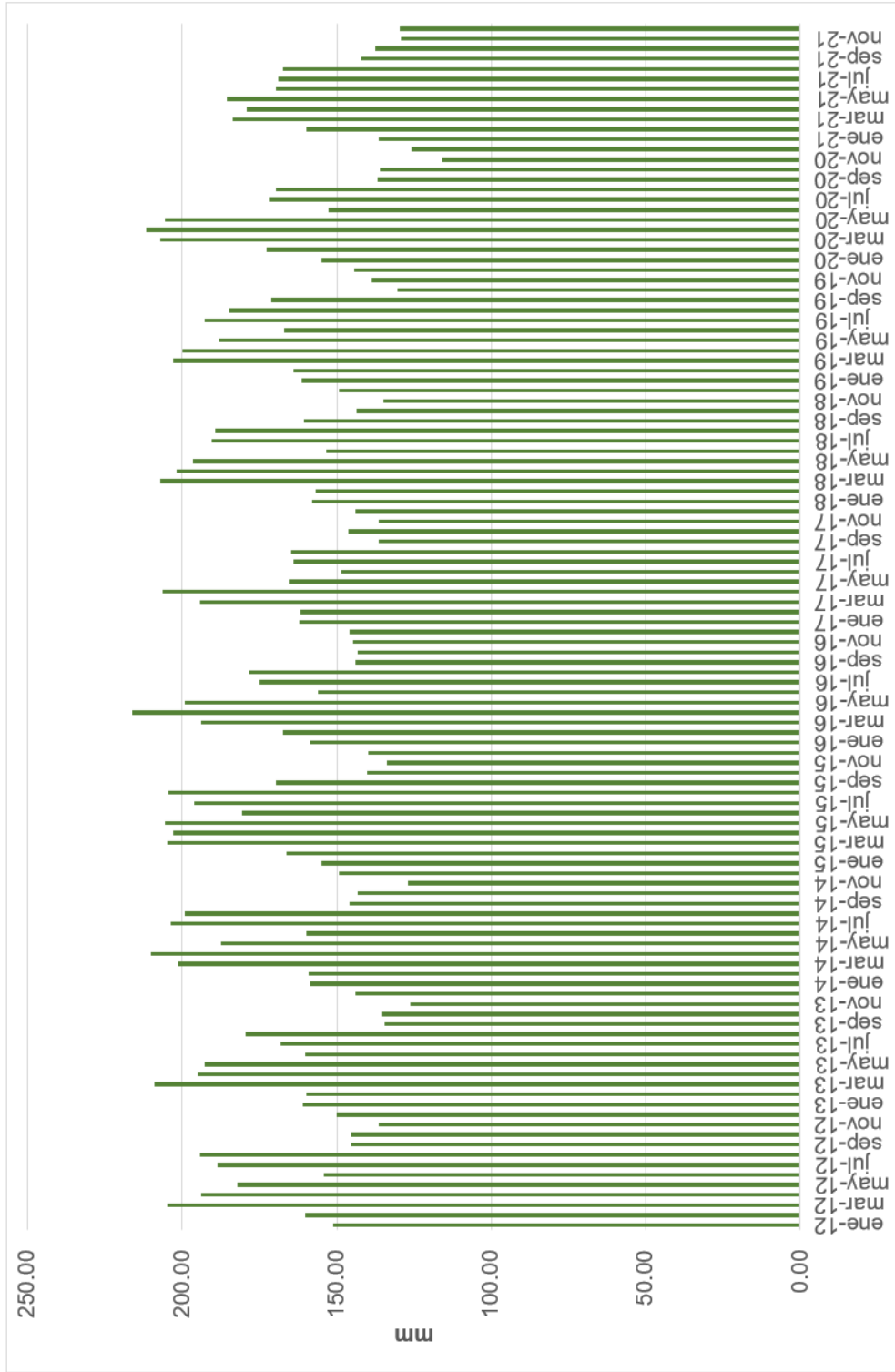
El mes con mayor valor de ETP fue abril en el año 2016 con 216 mm según ecuación de Hargreaves utilizada en el software RStudio y el mes con menor valor de ETP fue noviembre en el año 2020 con 115 mm (Figura 7). El valor promedio entre los periodos evaluados fue de 167 mm. Los datos utilizados para el ploteo de la gráfica se observan desde el apéndice 7 al 11, donde se encuentran ordenados los resultados producto del software RStudio.

- Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración

El valor de menor índice SPEI obtenido a través de los cálculos fue de -1.56 para el mes de julio del año 2015 y el valor de mayor índice fue 1.75 para el mes de diciembre del año 2021. Adicionalmente, los años con mayor cantidad de meses de sequía fueron 2015 y 2016, teniendo los 12 meses de ambos años índices negativos (Figura 8).

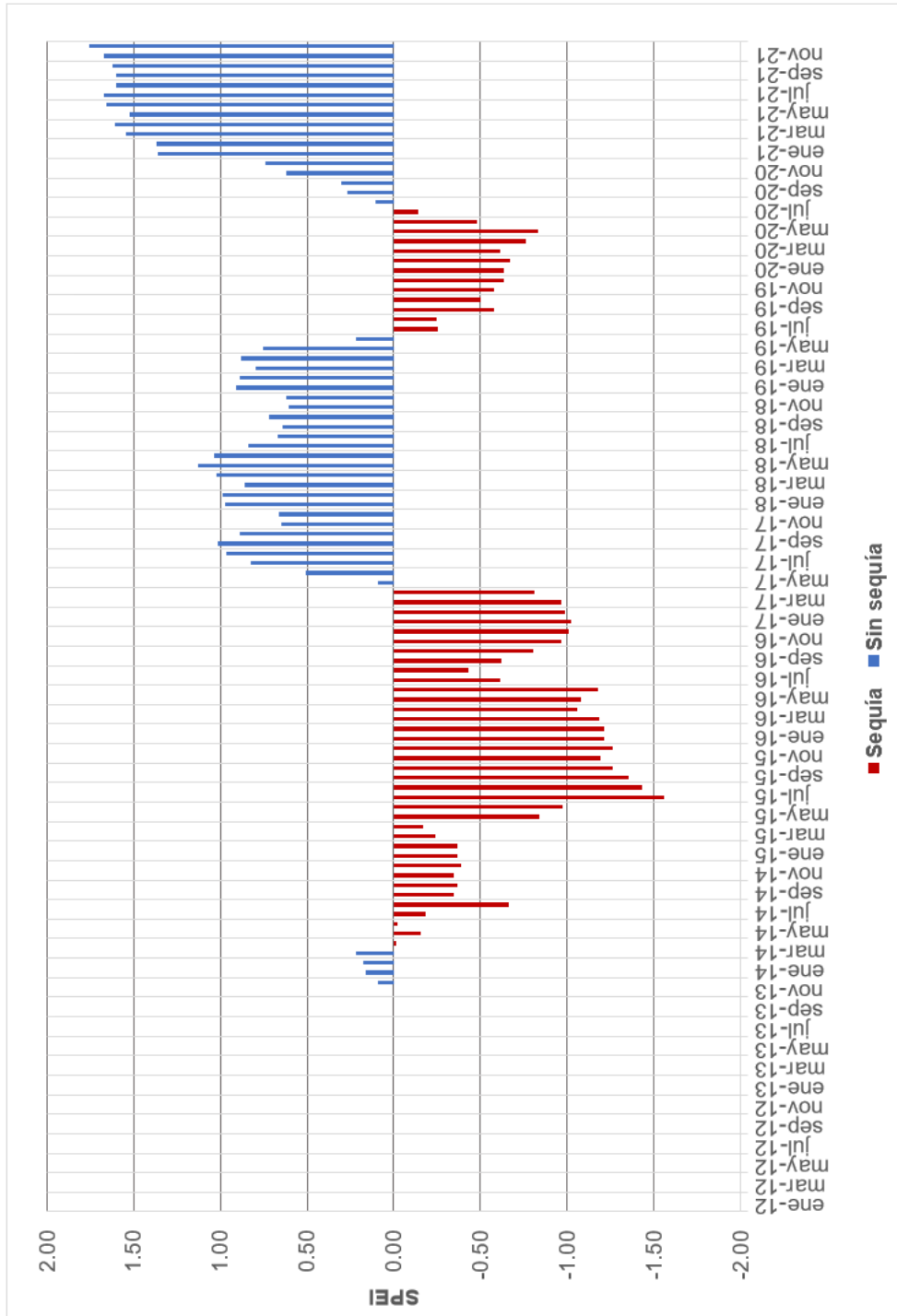


Figura 7. ETP en laguna de Olomega y El Jocotal 2012-2021



Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en Software RStudio.

Figura 8. SPEI en laguna de Olomega y el Jocotal 2012-2021



Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en Software RStudio.

### 3.1.2. Periodos de sequía seleccionados

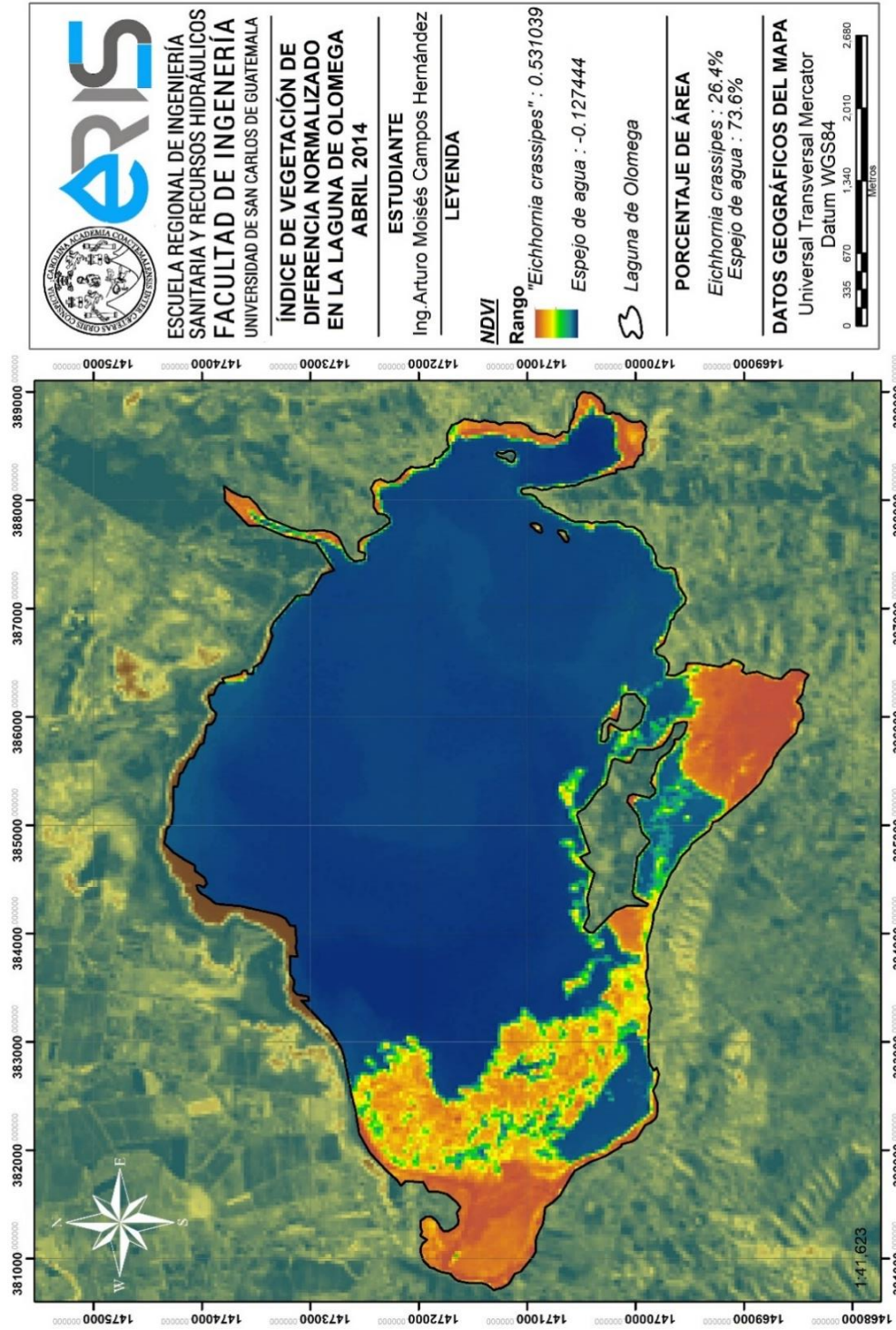
Los periodos de sequía en la laguna de Olomega y El Jocotal para el tiempo analizado se dieron durante los meses de abril a diciembre del año 2014 siendo este año el de periodos de sequía con índices menos extremos. Para los años 2015 y 2016 la sequía se mantuvo durante los 12 meses de cada año, el año 2015 fue el que tuvo los índices de sequía más extremos. Durante el año 2017 la sequía se mantuvo desde el mes de enero hasta abril. En el año 2019 se encontraron índices de sequía en los meses de julio a diciembre. Finalmente, para el año 2020 se localizaron en los meses de enero a julio.

### 3.2. Índice de vegetación de diferencia normalizado

El NDVI para la laguna de Olomega en abril 2014 varió entre los rangos 0.5 y -0.1, teniendo un 26.4 % de *Eichhornia crassipes* y 73.6 % de espejo de agua. En el periodo de julio 2020 se mantuvo entre los rangos 0.6 y -0.1, con 19.8 % de *Eichhornia crassipes* y 80.2 % de espejo de agua, esto indica una disminución del 6.6 % de *Eichhornia crassipes* entre ambos periodos (Figuras 9 y 10). Los apéndices 12 al 29 expresan los mapas de NDVI calculados en todos los periodos de sequía analizados.

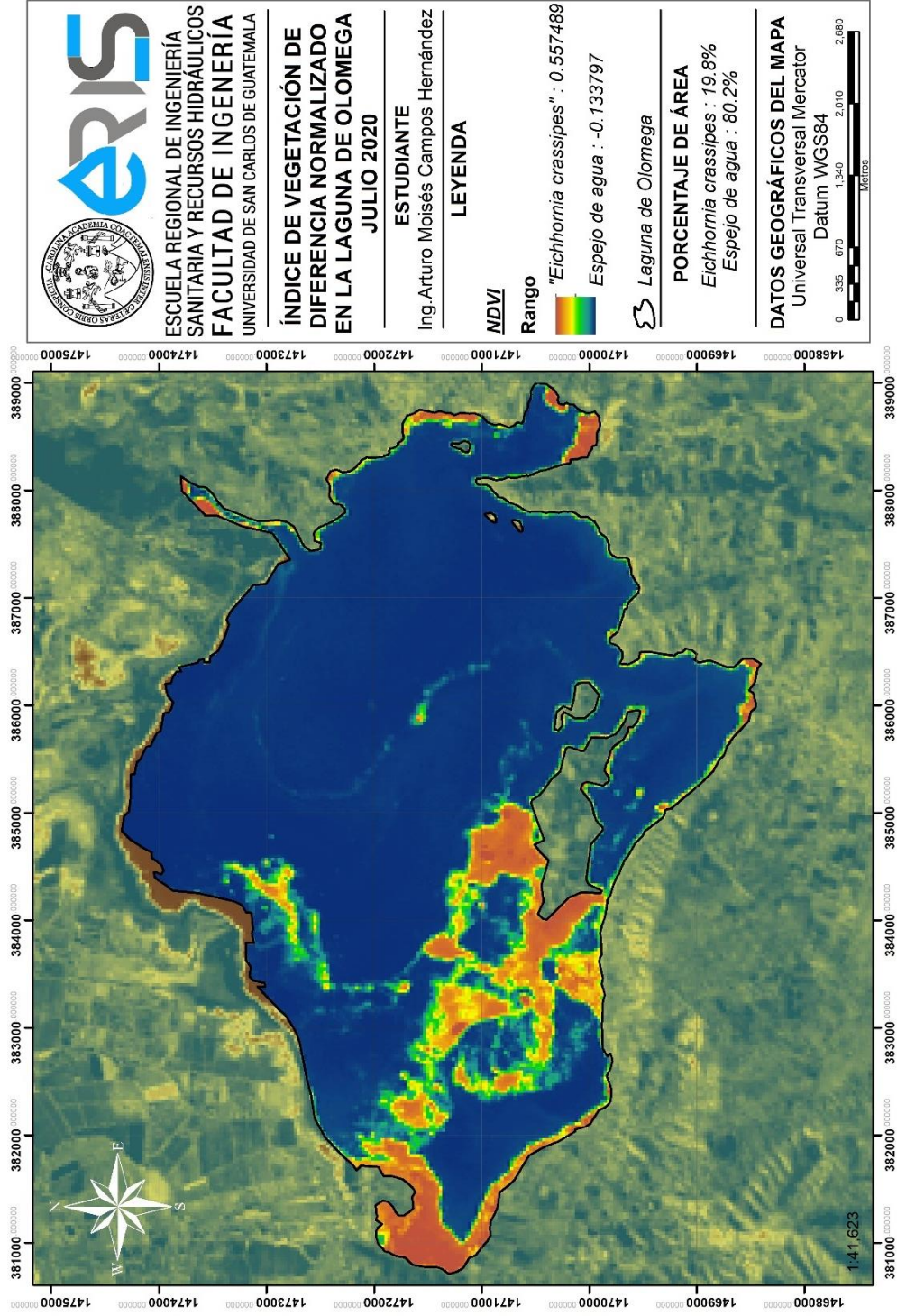
El NDVI en la laguna El Jocotal en abril 2014 estuvo entre los rangos 0.6 y -0.1, contando con 85.0 % de *Eichhornia crassipes* y 15.0 % de espejo de agua. En el periodo de julio 2020 se encontró entre los rangos 0.5 y -0.1, con 30.6 % de *Eichhornia crassipes* y 69.4 % de espejo de agua, significando una disminución del 54.4 % de *Eichhornia crassipes* entre ambos periodos (Figuras 11 y 12). Los apéndices 30 al 47 ilustran los mapas de NDVI calculados para los periodos de sequía analizados.

Figura 9. NDVI en laguna de Olomega abril 2014



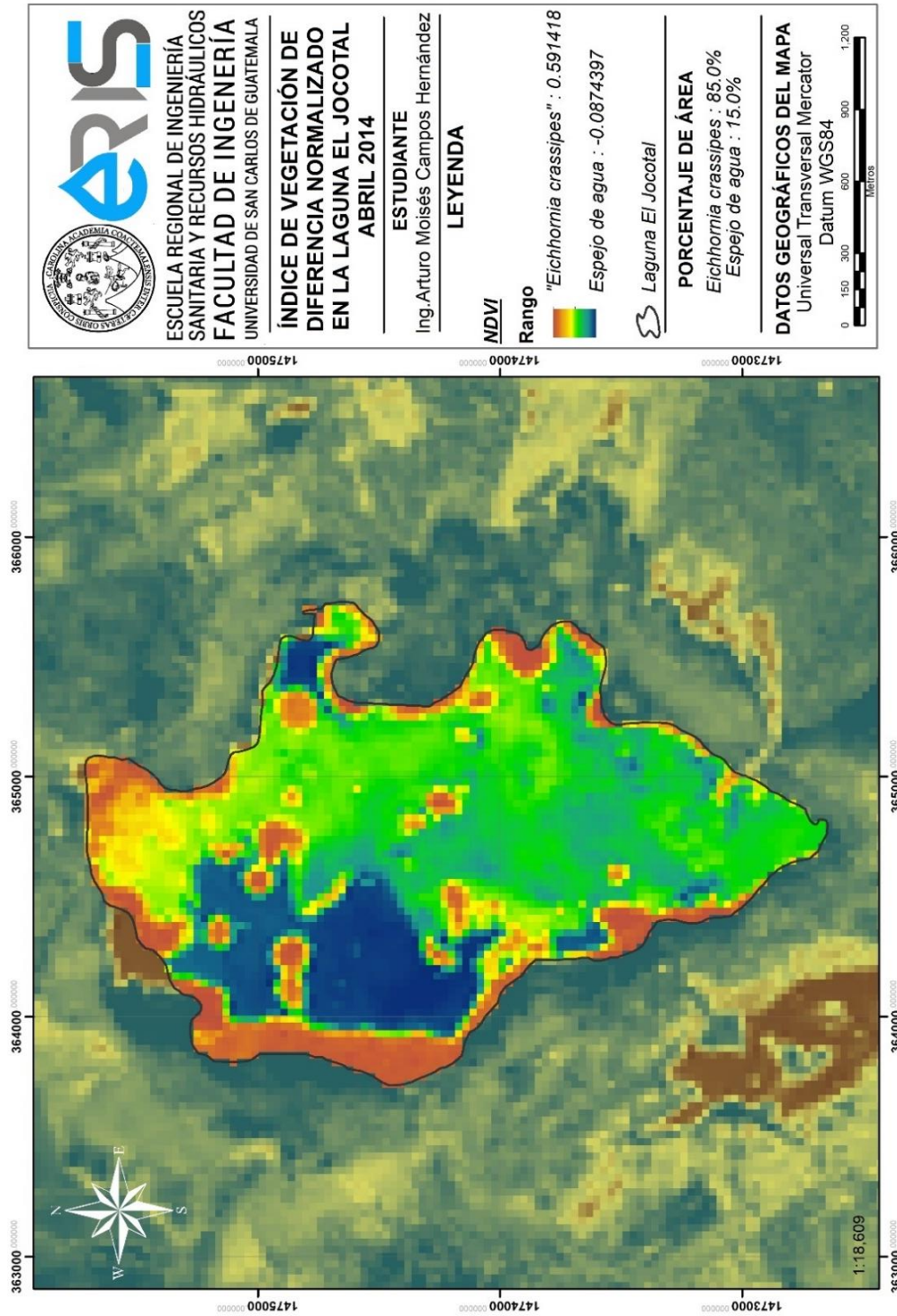
Fuente: elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Figura 10. NDVI en laguna de Olomega, julio 2020



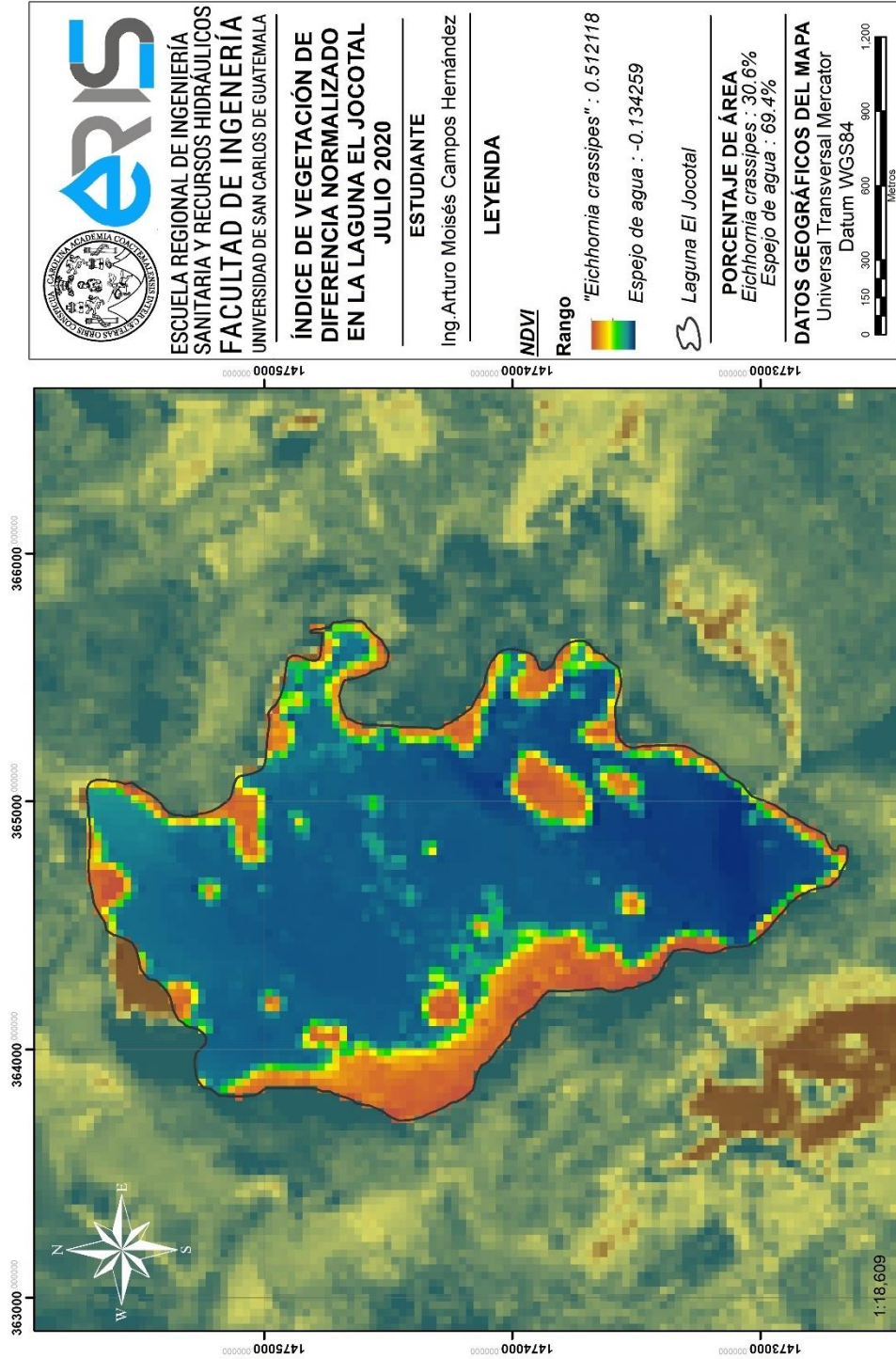
Fuente: elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Figura 11. NDVI en laguna El Jocotal, abril 2014



Fuente: elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Figura 12. NDVI en laguna El Jocotal julio, 2020



Fuente: elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

### 3.3. Matriz de transición de cobertura de *Eichhornia crassipes* y espejo de agua

A continuación, se presenta la matriz de transición de cobertura de *Eichhornia crassipes* y espejo de agua, comenzando con lo que es la laguna de Olomega.

#### 3.3.1. Laguna de Olomega

La cobertura que permaneció sin cambio entre ambos periodos fue de 311 ha de *Eichhornia crassipes* y 1,642 ha espejo de agua (tabla VIII). Durante el periodo de abril 2014, el espejo de agua tuvo una cobertura de 1,822 ha y 653 ha de *Eichhornia crassipes* para abril, siendo esta la fecha menos reciente. A diferencia de julio 2020, fecha más reciente, con 1,984 ha de espejo de agua y 491 ha de *Eichhornia crassipes*.

Tabla VIII. Matriz de transición abril 2014 a julio 2020, laguna de Olomega

| <b>Matriz de transición</b>                       | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|---|------------------------------|------------------------------------|--------------|
|   | <b>2014</b>                  | <b>2014</b>                        | <b>2014</b>  |
| <b><i>Espejo de agua</i></b><br><b>2020</b>       | <b>1,642</b>                 | 180                                | <b>1,822</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b><br><b>2020</b> | 342                          | <b>311</b>                         | <b>653</b>   |
| <b>Total 2020</b>                                 | <b>1,984</b>                 | <b>491</b>                         |              |

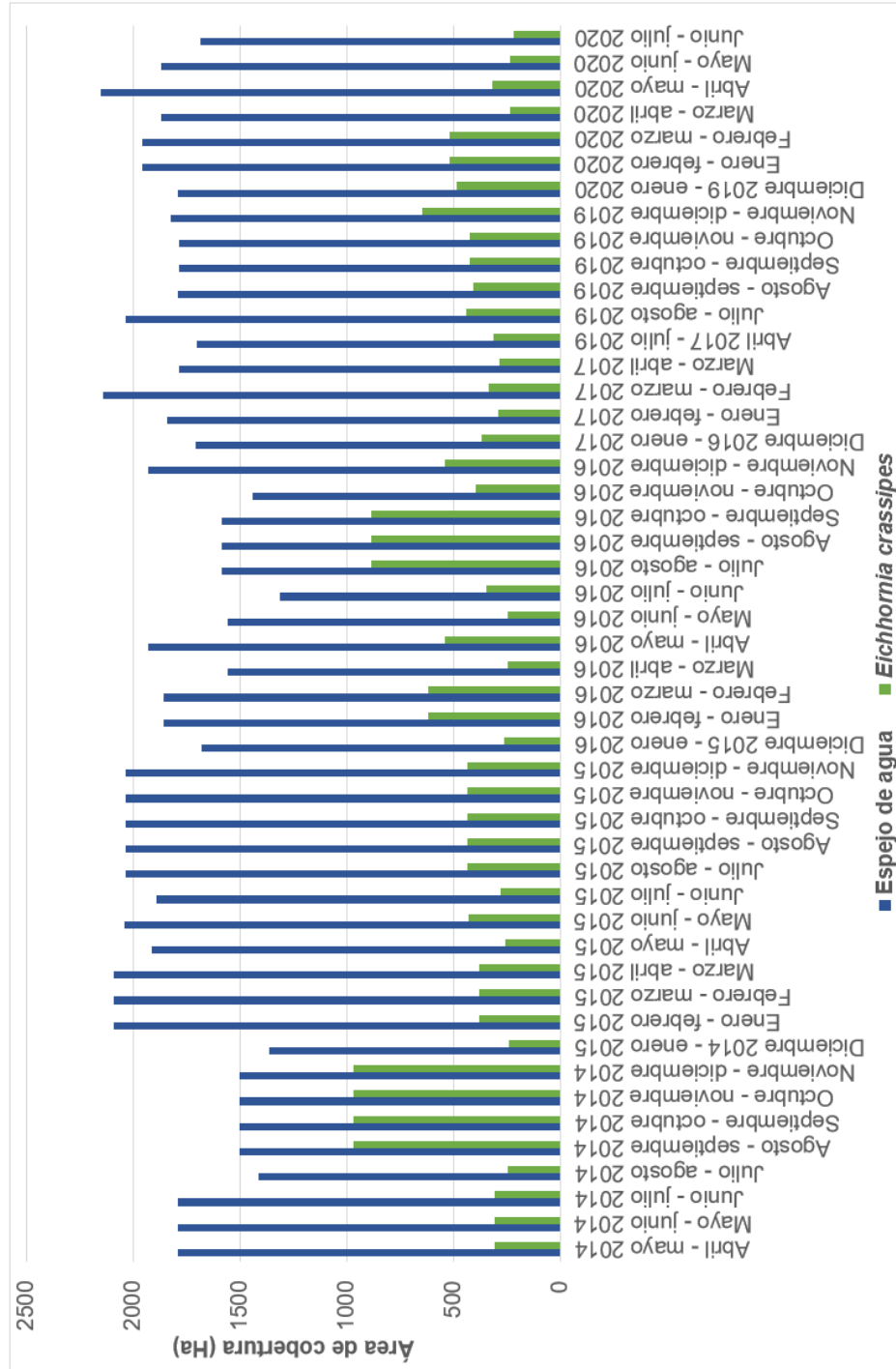
Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

El SPEI tiene un valor de -0.14 en julio 2020 lo cual indica sequía más severa, y una cobertura de 491 ha de *Eichhornia crassipes*, siendo menor a la *Eichhornia crassipes* de abril 2014 con 653 ha y un valor de SPEI -0.01, por lo



tanto, mayor índice de sequía no es sinónimo de mayor afloramiento de *Eichhornia crassipes* para la laguna de Olomega.

Figura 13. Gráfica de transición de cobertura en laguna de Olomega



Fuente: elaboración propia.

La mayor cobertura de espejo de agua que permaneció sin cambio fue en el periodo de transición abril - mayo 2020, con 2,153 ha, para el caso de la *Eichhornia crassipes* se dio en los periodos de agosto a diciembre 2014 con 971 ha, por otra parte, la menor cobertura de espejo de agua que permaneció sin cambio fue en el periodo de transición junio – julio 2016 con 1,314 ha y para la *Eichhornia crassipes* fue en el periodo de junio – julio 2020 con 220 ha (figura 13). Los apéndices 48 al 69 contienen las diferentes matrices de transición durante los periodos de sequía en la laguna de Olomega.

### 3.3.2. Laguna El Jocotal

La cobertura de *Eichhornia crassipes* que permaneció sin cambio entre ambos periodos fue de 91 ha, para el espejo de agua fue de 37 ha (tabla IX). Durante el periodo de abril 2014, el espejo de agua tuvo una cobertura de 51 ha y 291 ha de *Eichhornia crassipes*, siendo esta la fecha menos reciente. A diferencia de la fecha más reciente, siendo julio 2020 con 237 ha de espejo de agua y 105 ha de *Eichhornia crassipes*.

Tabla IX. Matriz de transición abril 2014 a julio 2020, laguna El Jocotal

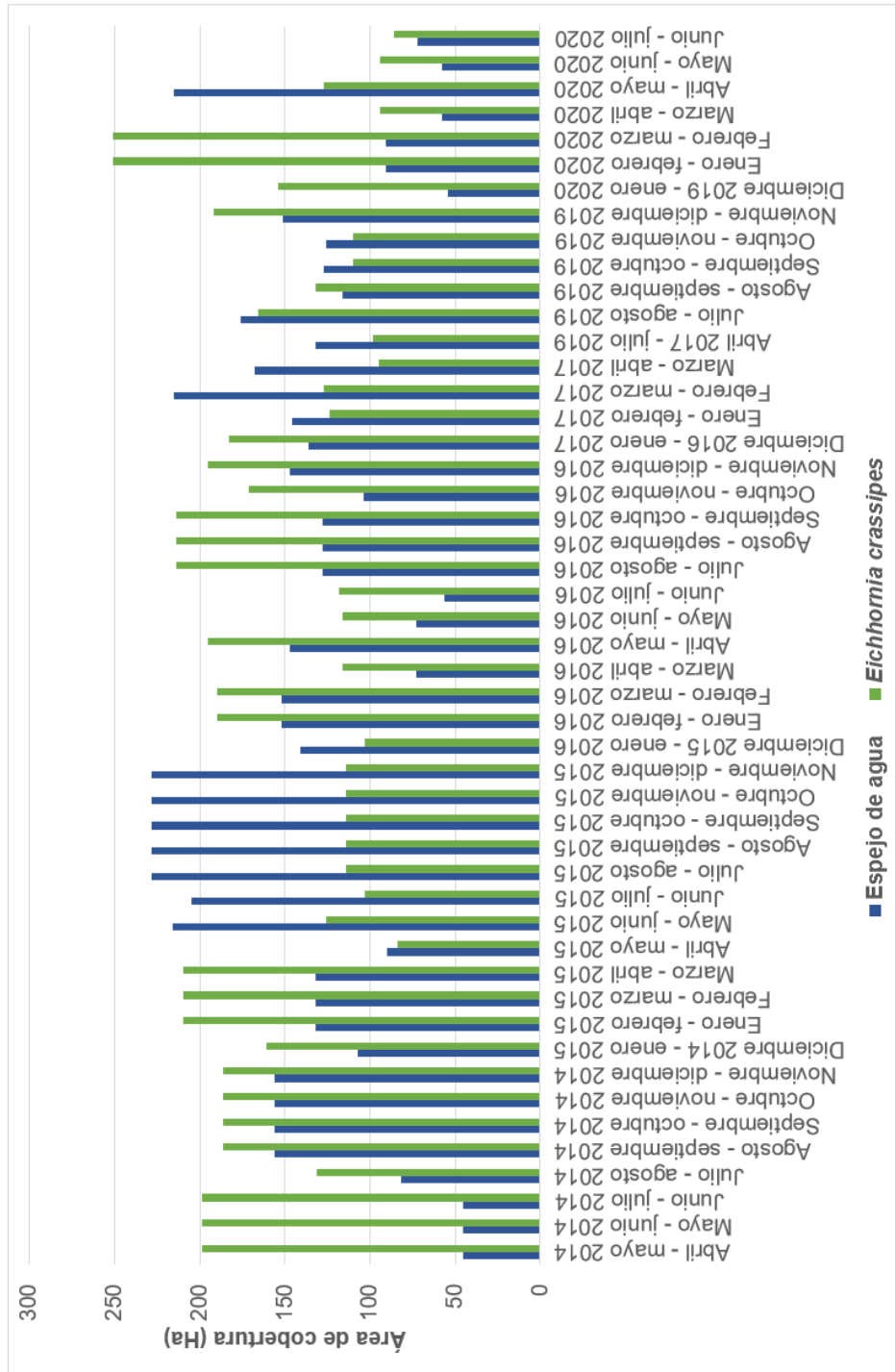
| Matriz de transición                | Espejo de agua<br>2014 | <i>Eichhornia crassipes</i><br>2014 | Total<br>2014 |
|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|---------------|
| <i>Espejo de agua</i><br>2020       | 37                     | 14                                  | 51            |
| <i>Eichhornia crassipes</i><br>2020 | 200                    | 91                                  | 291           |
| <b>Total 2020</b>                   | <b>237</b>             | <b>105</b>                          |               |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

El SPEI tiene un valor de -0.14 en julio 2020, y una cobertura de 105 ha de *Eichhornia crassipes*, siendo menor a la *Eichhornia crassipes* de abril 2014 con 291 ha y un valor de SPEI -0.01, por lo tanto, esto indica que mayor índice de sequía no es sinónimo de mayor afloramiento de *Eichhornia crassipes*.

La mayor cobertura de espejo de agua que permaneció sin cambio tuvo lugar en el periodo de transición julio – diciembre 2015, con 228 ha, para la *Eichhornia crassipes* se dio en los periodos de transición de enero - marzo 2020 con 251 ha. La menor cobertura de espejo de agua que permaneció sin cambio sucedió en el periodo de transición abril – julio 2014 con 45 ha y para la *Eichhornia crassipes* fue en el periodo de transición de abril – mayo 2015 con 84 ha (figura 14). Los apéndices 70 al 92 contienen las diferentes matrices de transición durante los periodos de sequía en la laguna El Jocotal.

Figura 14. Gráfica de transición de cobertura en laguna el Jocotal



Fuente: elaboración propia.



## CONCLUSIONES

1. Los periodos de sequía seleccionados que van de abril 2014 hasta abril 2017 y de julio 2019 a julio 2020, muestran que el fenómeno no es continuo en el tiempo (estación lluviosa que abarca de mayo a octubre y estación seca que empieza en noviembre y finaliza en abril), por lo que la intensidad de los eventos no tiene un patrón definido.
2. En el periodo abril 2014 en la laguna de Olomega, la cobertura de *Eichhornia crassipes* fue de 653 ha, y el espejo de agua tuvo 1,822 ha, con un índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración potencial de -0.01, en el periodo julio 2020, la cobertura de *Eichhornia crassipes* fue de 491 ha, y el espejo de agua tuvo 1,984 ha, con un índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración potencial de -0.14. Para el caso de la laguna El Jocotal, en el periodo abril 2014 la cobertura de *Eichhornia crassipes* fue de 291 ha, y el espejo de agua tuvo 51 ha, con un índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración potencial de -0.01, en el periodo julio 2020, la cobertura de *Eichhornia crassipes* fue de 105 ha, y el espejo de agua tuvo 237 ha, con un índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración potencial de -0.14. En consecuencia, durante los periodos de sequía se tiene un impacto en la disminución del espejo de agua para ambas lagunas, sin embargo, no se tiene un impacto en el aumento de *Eichhornia crassipes*.
3. El promedio de área sin cambio de espejo de agua para la laguna de Olomega fue de 1,791 ha y para la *Eichhornia crassipes* de 461 ha, con un área total de la laguna de 2,475 ha, aproximadamente el 91 %

permanece sin cambio. Para la laguna El Jocotal, el promedio sin cambio de espejo de agua fue de 134 ha y para la *Eichhornia crassipes* de 251 ha, para un total de la laguna de 342 ha, aproximadamente el 84 % permanece sin cambio. Por lo anterior, se afirma que la variabilidad que existe entre los periodos de sequía, independientemente sean parte de la estación lluviosa y seca, no afecta en el aumento de la *Eichhornia crassipes*, pese a superar en muchos casos la superficie cubierta registrada comúnmente, por tanto, en base a los resultados obtenidos se rechaza la hipótesis planteada para el estudio.





## RECOMENDACIONES

1. Es importante la obtención de datos meteorológicos de campo a través de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio, ya que estos permitirán crear una relación con los datos meteorológicos satelitales para obtener mejores análisis para este tipo de estudios.
2. Al existir dificultad para la obtención de datos meteorológicos in situ o por institutos de estudio y monitoreo meteorológicos e hidrológicos en este tipo de estudios, se valora el uso del portal NASA POWER DAV, el cual permite extraer valores de variables meteorológicas con cobertura mundial desde 1981 hasta la fecha. También, se puede considerar el uso del programa CLIMWAT for CROPWAT desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el cual muestra datos de algunas estaciones meteorológicas de cada país, sin embargo, se deberá tomar en cuenta que al usar dicho programa podrán no existir estaciones meteorológicas registradas en la zona cercana de estudio, además de que el programa solo genera datos del año actual.
3. Los sensores remotos permiten la identificación de diferentes parámetros en este tipo de estudios, tales como: área de cobertura de especies de PAI, calidad del agua, predicción de puntos de desbordamiento por inundaciones, seguimiento de sedimentos generados por actividades agrícolas y vertidos industriales, entre otros. Por lo que, si se quiere estudiar diferentes áreas a través de los sensores remotos, se puede continuar con el análisis de los parámetros mencionados.



## REFERENCIAS

1. Amado Guevara, E. A. (2016). *Estudio de información geográfica para apoyar la elaboración de planes de implantación, utilizando ArcGIS*. Colombia: Universidad de Manizales.
2. Bravo Morales, N. F. (2017). *Teoría: Teledetección Espacial LANDSAT, SENTINEL-2, ASTER L1T y MODIS*. Perú: Geomática ambiental.
3. De la Cruz, J. y Muñoz, G. (2016). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal y cambio de uso del suelo del área de influencia del programa de reforestación de la federación nacional de cafeteros en el municipio de Popayán, Cauca*. (Tesis de maestría) Universidad de Manizales. Colombia.
4. Delpino Aguayo, M. A., Portillo Sosa, V. M., Mora Stanley, C. R. (2018). *Evaluación de índices espectrales de sensores remotos para la caracterización de ambientes de humedales*. Paraguay: Editorial Eduvisión.
5. Fandos, C., Carreras Baldrés, Javier I., Scandaliaris, P., Soria, F. J., Gamboa, D. E., Devani, M. R. (2019). *Uso de Teledetección y SIG para la detección de frecuencias de rotación soja/maíz en el departamento Burruyacu, provincia de Tucumán, Argentina*. Argentina: Editorial Planeta.

6. Hargraves, G. H. y Samani, Z. A. (1985) *Reference Crop Evapotranspiration from Temperature*. United States of America: American Society of Agricultural Engineers.
7. Lemus Araujo, J. A. y Guevara, M. J. (2017). *Análisis del comportamiento de la sequía meteorológica durante la estación lluviosa en la zona oriental de El Salvador*. (Trabajo de graduación) Facultad Multidisciplinaria Oriental, Universidad de El Salvador, El Salvador.
8. Magaña, V., Méndez, B., Neri, C. y Vázquez, G. (2018). *El riesgo ante la sequía meteorológica en México*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
9. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2011). *Catálogo de Mapas de Zonas Críticas Prioritarias en Humedales Ramsar de El Salvador*. El Salvador: MARN.
10. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Inventario Nacional de Humedales, El Salvador*. El Salvador: MARN.
11. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). *Protocolo para el control de jacinto de agua y otras plantas acuáticas invasoras (PAI)*. El Salvador: MARN.
12. Zanter, K. (2016). *Landsat 8 (L8) data users Handbook LSDS-1574*. United States of America: Department of the Interior U.S. Geological Survey.



## APÉNDICES

Apéndice 1. Datos meteorológicos de laguna Olomega y El Jocotal, año  
2012

| Año  | Mes | P (mm) | Tmáx (°C) | Tmin (°C) |
|------|-----|--------|-----------|-----------|
| 2012 | 1   | 0      | 34        | 18        |
| 2012 | 2   | 0      | 36        | 19        |
| 2012 | 3   | 5      | 38        | 20        |
| 2012 | 4   | 132    | 36        | 21        |
| 2012 | 5   | 142    | 35        | 23        |
| 2012 | 6   | 127    | 32        | 22        |
| 2012 | 7   | 47     | 36        | 22        |
| 2012 | 8   | 359    | 36        | 22        |
| 2012 | 9   | 185    | 31        | 21        |
| 2012 | 10  | 195    | 32        | 20        |
| 2012 | 11  | 0      | 31        | 18        |
| 2012 | 12  | 11     | 34        | 19        |

Fuente: elaboración propia, con base en datos de National Aeronautics and Space  
Administration.

Apéndice 2. **Datos meteorológicos de laguna Olomega y El Jocotal, año 2013-2014**

| <b>Año</b> | <b>Mes</b> | <b>P (mm)</b> | <b>Tmáx (°C)</b> | <b>Tmin (°C)</b> |
|------------|------------|---------------|------------------|------------------|
| 2013       | 1          | 0             | 36               | 19               |
| 2013       | 2          | 0             | 36               | 21               |
| 2013       | 3          | 0             | 37               | 18               |
| 2013       | 4          | 47            | 38               | 24               |
| 2013       | 5          | 163           | 36               | 23               |
| 2013       | 6          | 169           | 34               | 23               |
| 2013       | 7          | 127           | 33               | 22               |
| 2013       | 8          | 153           | 35               | 22               |
| 2013       | 9          | 206           | 31               | 22               |
| 2013       | 10         | 221           | 31               | 22               |
| 2013       | 11         | 42            | 31               | 20               |
| 2013       | 12         | 5             | 34               | 19               |
| 2014       | 1          | 0             | 35               | 19               |
| 2014       | 2          | 0             | 36               | 21               |
| 2014       | 3          | 5             | 38               | 23               |
| 2014       | 4          | 0             | 38               | 21               |
| 2014       | 5          | 137           | 36               | 23               |
| 2014       | 6          | 174           | 33               | 22               |
| 2014       | 7          | 32            | 37               | 22               |
| 2014       | 8          | 179           | 37               | 22               |
| 2014       | 9          | 285           | 32               | 22               |
| 2014       | 10         | 216           | 32               | 21               |
| 2014       | 11         | 37            | 31               | 19               |
| 2014       | 12         | 0             | 34               | 18               |

Fuente: elaboración propia, con base en datos de National Aeronautics and Space Administration.

Apéndice 3. **Datos meteorológicos de laguna Olomega y El Jocotal, año 2015-2016**

| <b>Año</b> | <b>Mes</b> | <b>P (mm)</b> | <b>Tmáx (°C)</b> | <b>Tmin (°C)</b> |
|------------|------------|---------------|------------------|------------------|
| 2015       | 1          | 0             | 35               | 19               |
| 2015       | 2          | 0             | 37               | 20               |
| 2015       | 3          | 16            | 38               | 21               |
| 2015       | 4          | 16            | 39               | 24               |
| 2015       | 5          | 42            | 38               | 24               |
| 2015       | 6          | 200           | 35               | 22               |
| 2015       | 7          | 37            | 37               | 22               |
| 2015       | 8          | 69            | 38               | 23               |
| 2015       | 9          | 274           | 35               | 23               |
| 2015       | 10         | 269           | 32               | 22               |
| 2015       | 11         | 84            | 31               | 18               |
| 2015       | 12         | 11            | 34               | 20               |
| 2016       | 1          | 0             | 35               | 19               |
| 2016       | 2          | 0             | 37               | 19               |
| 2016       | 3          | 11            | 38               | 23               |
| 2016       | 4          | 42            | 39               | 22               |
| 2016       | 5          | 153           | 37               | 24               |
| 2016       | 6          | 200           | 33               | 22               |
| 2016       | 7          | 95            | 34               | 23               |
| 2016       | 8          | 153           | 35               | 24               |
| 2016       | 9          | 227           | 32               | 22               |
| 2016       | 10         | 190           | 32               | 21               |
| 2016       | 11         | 32            | 33               | 18               |
| 2016       | 12         | 5             | 34               | 19               |

Fuente: elaboración propia, con base en datos de National Aeronautics and Space Administration.



Apéndice 4. **Datos meteorológicos de laguna Olomega y El Jocotal, año 2017-2018**

| <b>Año</b> | <b>Mes</b> | <b>P (mm)</b> | <b>Tmáx (°C)</b> | <b>Tmin (°C)</b> |
|------------|------------|---------------|------------------|------------------|
| 2017       | 1          | 0             | 36               | 19               |
| 2017       | 2          | 0             | 37               | 21               |
| 2017       | 3          | 5             | 37               | 22               |
| 2017       | 4          | 42            | 39               | 23               |
| 2017       | 5          | 253           | 34               | 23               |
| 2017       | 6          | 306           | 32               | 22               |
| 2017       | 7          | 185           | 32               | 21               |
| 2017       | 8          | 190           | 33               | 22               |
| 2017       | 9          | 285           | 31               | 23               |
| 2017       | 10         | 216           | 32               | 21               |
| 2017       | 11         | 0             | 32               | 19               |
| 2017       | 12         | 5             | 33               | 18               |
| 2018       | 1          | 0             | 35               | 19               |
| 2018       | 2          | 0             | 36               | 20               |
| 2018       | 3          | 0             | 38               | 20               |
| 2018       | 4          | 53            | 38               | 22               |
| 2018       | 5          | 237           | 37               | 23               |
| 2018       | 6          | 121           | 32               | 22               |
| 2018       | 7          | 47            | 36               | 22               |
| 2018       | 8          | 132           | 36               | 23               |
| 2018       | 9          | 227           | 34               | 23               |
| 2018       | 10         | 269           | 32               | 21               |
| 2018       | 11         | 16            | 33               | 21               |
| 2018       | 12         | 0             | 35               | 19               |

Fuente: elaboración propia, con base en datos de National Aeronautics and Space Administration.

Apéndice 5. Datos meteorológicos de laguna Olomega y El Jocotal, año  
2019-2020

| Año  | Mes | P (mm) | Tmáx (°C) | Tmin (°C) |
|------|-----|--------|-----------|-----------|
| 2019 | 1   | 0      | 36        | 21        |
| 2019 | 2   | 0      | 37        | 21        |
| 2019 | 3   | 0      | 38        | 21        |
| 2019 | 4   | 5      | 38        | 24        |
| 2019 | 5   | 237    | 36        | 23        |
| 2019 | 6   | 105    | 34        | 23        |
| 2019 | 7   | 95     | 36        | 22        |
| 2019 | 8   | 179    | 35        | 23        |
| 2019 | 9   | 211    | 35        | 22        |
| 2019 | 10  | 253    | 31        | 22        |
| 2019 | 11  | 11     | 33        | 21        |
| 2019 | 12  | 0      | 34        | 20        |
| 2020 | 1   | 0      | 36        | 21        |
| 2020 | 2   | 0      | 39        | 22        |
| 2020 | 3   | 0      | 38        | 22        |
| 2020 | 4   | 0      | 40        | 24        |
| 2020 | 5   | 248    | 38        | 23        |
| 2020 | 6   | 221    | 32        | 22        |
| 2020 | 7   | 116    | 34        | 22        |
| 2020 | 8   | 185    | 34        | 22        |
| 2020 | 9   | 269    | 31        | 23        |
| 2020 | 10  | 311    | 31        | 22        |
| 2020 | 11  | 216    | 30        | 21        |
| 2020 | 12  | 32     | 30        | 18        |

Fuente: elaboración propia, con base en datos de National Aeronautics and Space Administration.

Apéndice 6. **Datos meteorológicos de laguna Olomega y El Jocotal, año 2021**

| <b>Año</b> | <b>Mes</b> | <b>P (mm)</b> | <b>Tmáx (°C)</b> | <b>Tmin (°C)</b> |
|------------|------------|---------------|------------------|------------------|
| 2021       | 1          | 100           | 32               | 19               |
| 2021       | 2          | 11            | 34               | 17               |
| 2021       | 3          | 216           | 35               | 20               |
| 2021       | 4          | 81            | 35               | 22               |
| 2021       | 5          | 120           | 35               | 23               |
| 2021       | 6          | 241           | 35               | 23               |
| 2021       | 7          | 157           | 33               | 22               |
| 2021       | 8          | 238           | 33               | 22               |
| 2021       | 9          | 214           | 32               | 23               |
| 2021       | 10         | 312           | 32               | 22               |
| 2021       | 11         | 125           | 31               | 19               |
| 2021       | 12         | 103           | 31               | 19               |

Fuente: elaboración propia, con base en datos de National Aeronautics and Space Administration.

Apéndice 7. **Cálculos de ETP y SPEI en laguna de Olomega y El Jocotal,**  
**año 2012-2013**

| <b>Año</b> | <b>Mes</b> | <b>ETP (mm)</b> | <b>SPEI</b> |
|------------|------------|-----------------|-------------|
| 2012       | 1          | 151             | 0.00        |
| 2012       | 2          | 160             | 0.00        |
| 2012       | 3          | 205             | 0.00        |
| 2012       | 4          | 194             | 0.00        |
| 2012       | 5          | 182             | 0.00        |
| 2012       | 6          | 154             | 0.00        |
| 2012       | 7          | 189             | 0.00        |
| 2012       | 8          | 194             | 0.00        |
| 2012       | 9          | 146             | 0.00        |
| 2012       | 10         | 146             | 0.00        |
| 2012       | 11         | 136             | 0.00        |
| 2012       | 12         | 150             | 0.00        |
| 2013       | 1          | 161             | 0.00        |
| 2013       | 2          | 160             | 0.00        |
| 2013       | 3          | 209             | 0.00        |
| 2013       | 4          | 195             | 0.00        |
| 2013       | 5          | 193             | 0.00        |
| 2013       | 6          | 160             | 0.00        |
| 2013       | 7          | 168             | 0.00        |
| 2013       | 8          | 180             | 0.00        |
| 2013       | 9          | 135             | 0.00        |
| 2013       | 10         | 135             | 0.00        |
| 2013       | 11         | 126             | 0.00        |
| 2013       | 12         | 144             | 0.09        |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software RStudio.

Apéndice 8. **Cálculos de ETP y SPEI en laguna de Olomega y El Jocotal, año 2014-2015**

| <b>Año</b> | <b>Mes</b> | <b>ETP (mm)</b> | <b>SPEI</b> |
|------------|------------|-----------------|-------------|
| 2014       | 1          | 159             | 0.16        |
| 2014       | 2          | 159             | 0.17        |
| 2014       | 3          | 202             | 0.22        |
| 2014       | 4          | 210             | -0.01       |
| 2014       | 5          | 187             | -0.16       |
| 2014       | 6          | 160             | -0.02       |
| 2014       | 7          | 204             | -0.18       |
| 2014       | 8          | 199             | -0.66       |
| 2014       | 9          | 146             | -0.35       |
| 2014       | 10         | 143             | -0.37       |
| 2014       | 11         | 127             | -0.35       |
| 2014       | 12         | 149             | -0.39       |
| 2015       | 1          | 155             | -0.37       |
| 2015       | 2          | 166             | -0.37       |
| 2015       | 3          | 205             | -0.24       |
| 2015       | 4          | 203             | -0.17       |
| 2015       | 5          | 205             | -0.84       |
| 2015       | 6          | 181             | -0.97       |
| 2015       | 7          | 196             | -1.56       |
| 2015       | 8          | 204             | -1.43       |
| 2015       | 9          | 170             | -1.35       |
| 2015       | 10         | 140             | -1.27       |
| 2015       | 11         | 134             | -1.19       |
| 2015       | 12         | 140             | -1.27       |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software RStudio.

Apéndice 9. **Cálculos de ETP y SPEI en laguna de Olomega y El Jocotal,**  
**año 2016-2017**

| <b>Año</b> | <b>Mes</b> | <b>ETP (mm)</b> | <b>SPEI</b> |
|------------|------------|-----------------|-------------|
| 2016       | 1          | 159             | -1.21       |
| 2016       | 2          | 168             | -1.22       |
| 2016       | 3          | 194             | -1.19       |
| 2016       | 4          | 216             | -1.06       |
| 2016       | 5          | 199             | -1.08       |
| 2016       | 6          | 156             | -1.18       |
| 2016       | 7          | 175             | -0.61       |
| 2016       | 8          | 178             | -0.43       |
| 2016       | 9          | 144             | -0.62       |
| 2016       | 10         | 143             | -0.80       |
| 2016       | 11         | 145             | -0.97       |
| 2016       | 12         | 146             | -1.01       |
| 2017       | 1          | 162             | -1.02       |
| 2017       | 2          | 162             | -0.99       |
| 2017       | 3          | 194             | -0.97       |
| 2017       | 4          | 206             | -0.81       |
| 2017       | 5          | 165             | 0.09        |
| 2017       | 6          | 149             | 0.51        |
| 2017       | 7          | 164             | 0.82        |
| 2017       | 8          | 165             | 0.96        |
| 2017       | 9          | 137             | 1.02        |
| 2017       | 10         | 146             | 0.89        |
| 2017       | 11         | 136             | 0.65        |
| 2017       | 12         | 144             | 0.66        |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software RStudio.

Apéndice 10. **Cálculos de ETP y SPEI en laguna de Olomega y El Jocotal, año 2018-2019**

| <b>Año</b> | <b>Mes</b> | <b>ETP (mm)</b> | <b>SPEI</b> |
|------------|------------|-----------------|-------------|
| 2018       | 1          | 158             | 0.97        |
| 2018       | 2          | 157             | 0.98        |
| 2018       | 3          | 207             | 0.86        |
| 2018       | 4          | 202             | 1.03        |
| 2018       | 5          | 197             | 1.13        |
| 2018       | 6          | 154             | 1.04        |
| 2018       | 7          | 191             | 0.84        |
| 2018       | 8          | 189             | 0.67        |
| 2018       | 9          | 161             | 0.64        |
| 2018       | 10         | 144             | 0.72        |
| 2018       | 11         | 135             | 0.61        |
| 2018       | 12         | 149             | 0.62        |
| 2019       | 1          | 161             | 0.91        |
| 2019       | 2          | 164             | 0.89        |
| 2019       | 3          | 203             | 0.80        |
| 2019       | 4          | 200             | 0.88        |
| 2019       | 5          | 188             | 0.75        |
| 2019       | 6          | 167             | 0.22        |
| 2019       | 7          | 193             | -0.25       |
| 2019       | 8          | 185             | -0.25       |
| 2019       | 9          | 171             | -0.58       |
| 2019       | 10         | 130             | -0.50       |
| 2019       | 11         | 139             | -0.58       |
| 2019       | 12         | 144             | -0.63       |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software RStudio.

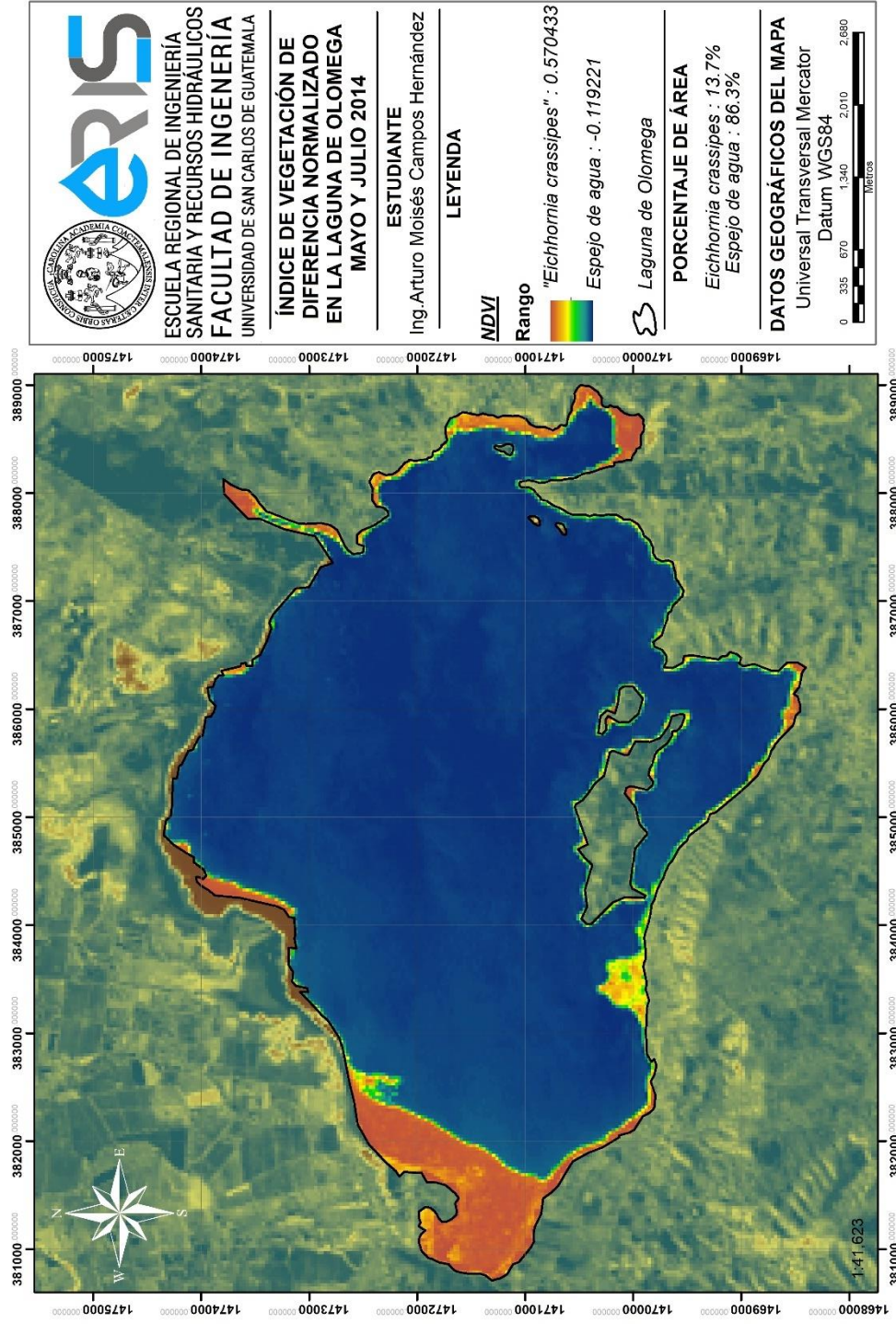
Apéndice 11. **Cálculos de ETP y SPEI en laguna de Olomega y El Jocotal,**  
**año 2020-2021**

| <b>Año</b> | <b>Mes</b> | <b>ETP (mm)</b> | <b>SPEI</b> |
|------------|------------|-----------------|-------------|
| 2020       | 1          | 155             | -0.64       |
| 2020       | 2          | 173             | -0.67       |
| 2020       | 3          | 207             | -0.61       |
| 2020       | 4          | 212             | -0.76       |
| 2020       | 5          | 206             | -0.83       |
| 2020       | 6          | 153             | -0.48       |
| 2020       | 7          | 172             | -0.14       |
| 2020       | 8          | 170             | 0.10        |
| 2020       | 9          | 137             | 0.27        |
| 2020       | 10         | 136             | 0.30        |
| 2020       | 11         | 116             | 0.62        |
| 2020       | 12         | 126             | 0.74        |
| 2021       | 1          | 136             | 1.36        |
| 2021       | 2          | 160             | 1.36        |
| 2021       | 3          | 184             | 1.55        |
| 2021       | 4          | 179             | 1.61        |
| 2021       | 5          | 185             | 1.53        |
| 2021       | 6          | 170             | 1.66        |
| 2021       | 7          | 169             | 1.67        |
| 2021       | 8          | 168             | 1.60        |
| 2021       | 9          | 142             | 1.60        |
| 2021       | 10         | 137             | 1.62        |
| 2021       | 11         | 129             | 1.67        |
| 2021       | 12         | 129             | 1.75        |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software RStudio.

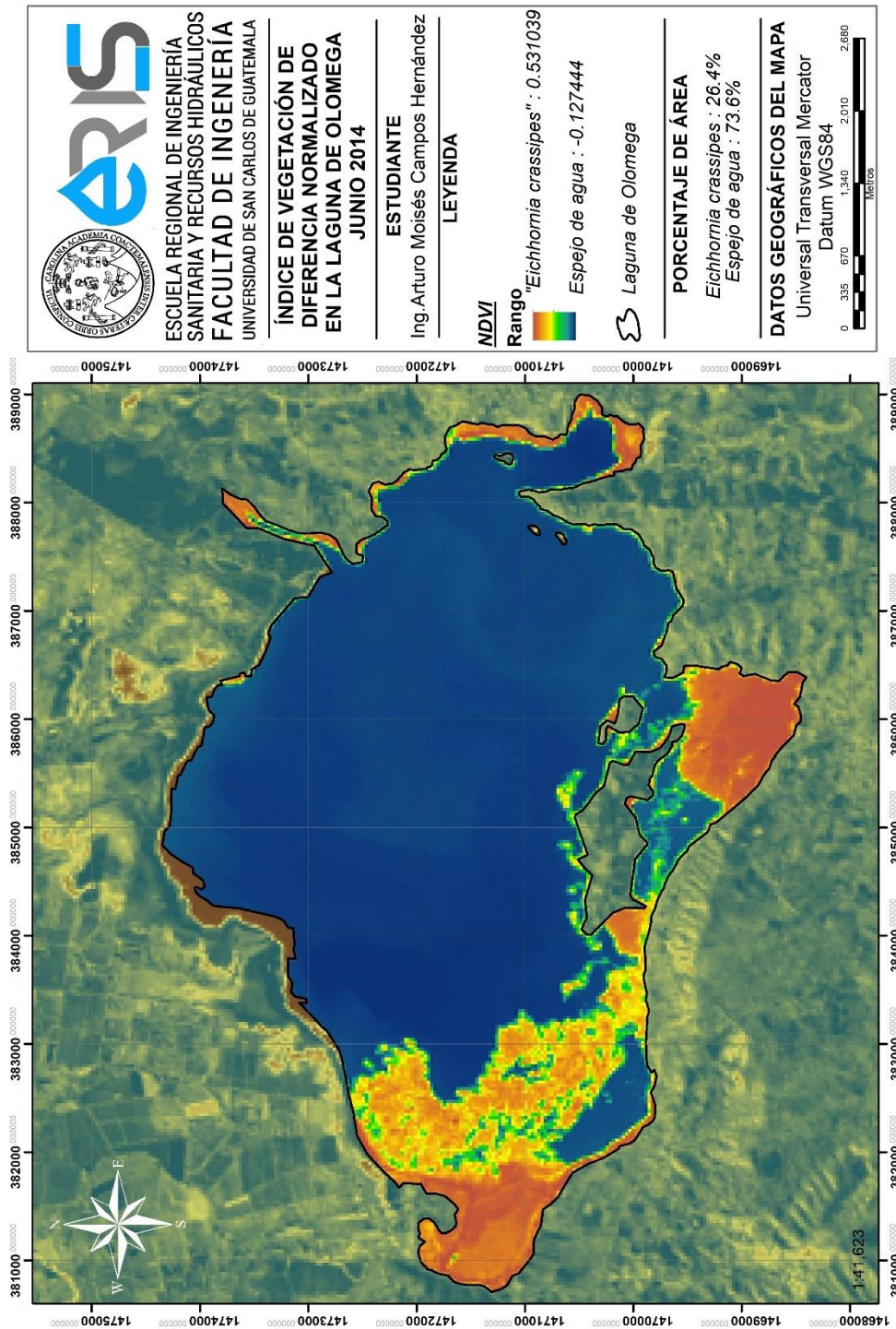


Apéndice 12. NDVI en laguna de Olomega, mayo y julio 2014



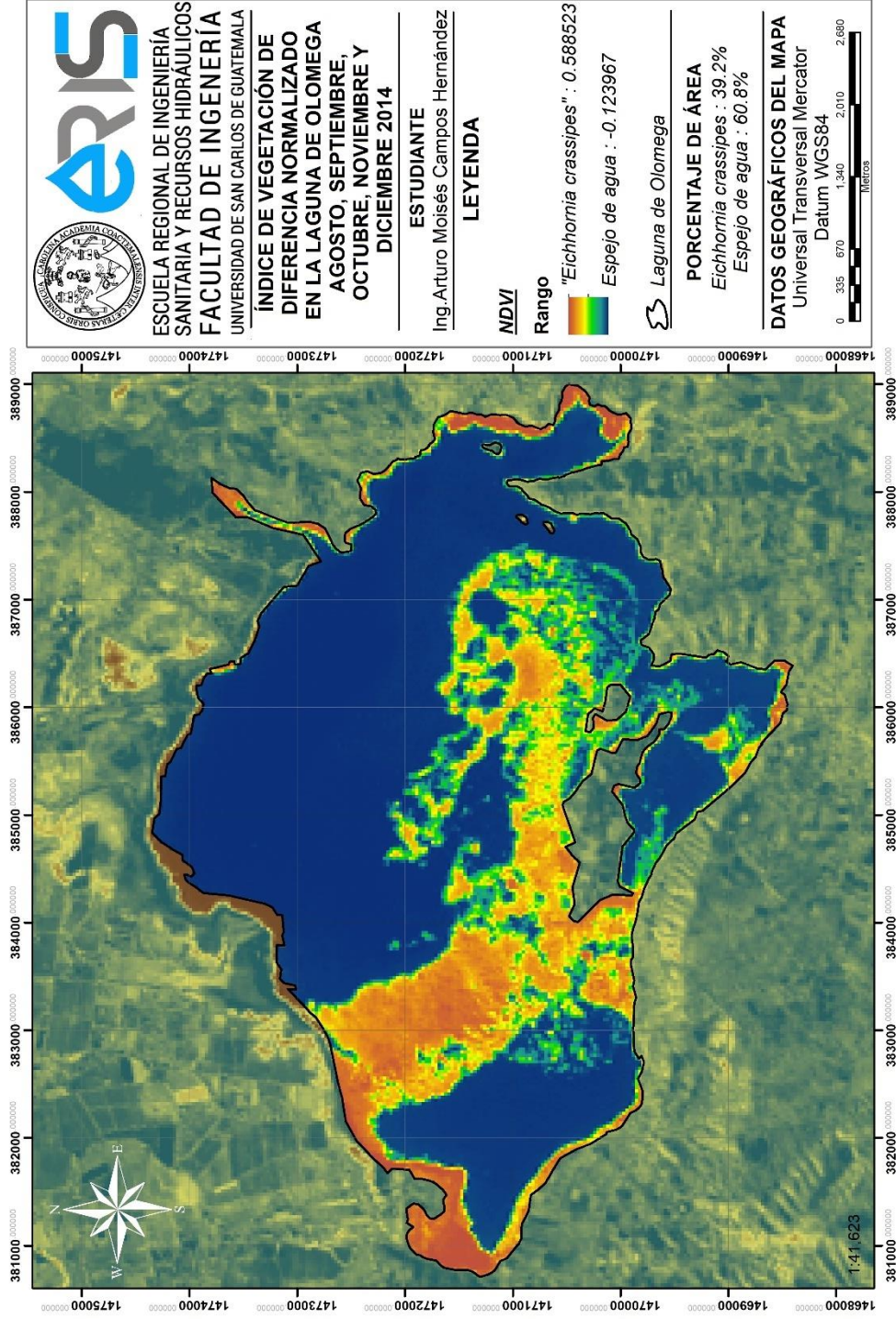
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

### Apéndice 13. NDVI en laguna de Olomega, junio 2014



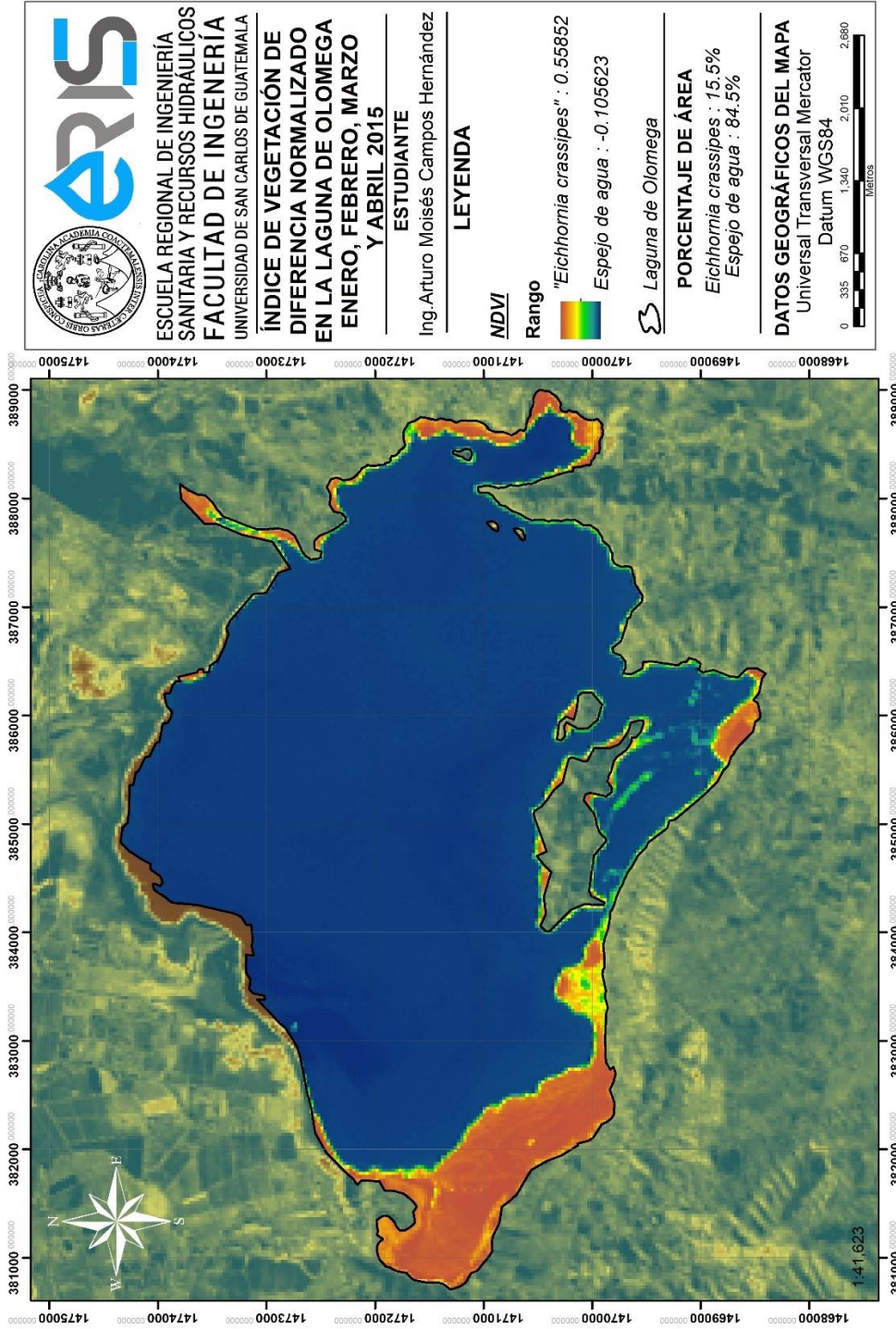
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 14. NDVI en laguna de Olomega, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre 2014



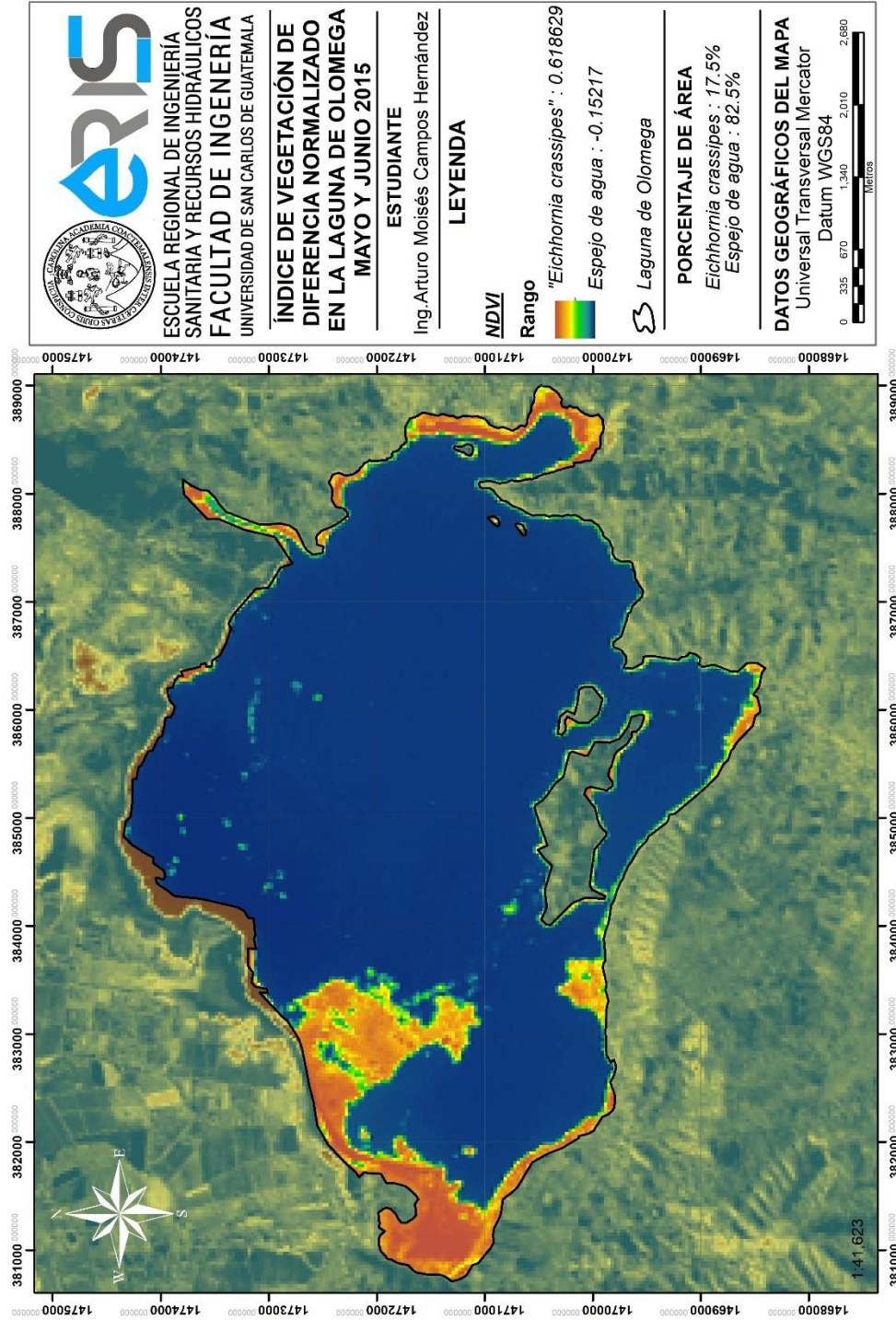
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 15. NDVI en laguna de Olomega, enero, febrero, marzo y abril 2015



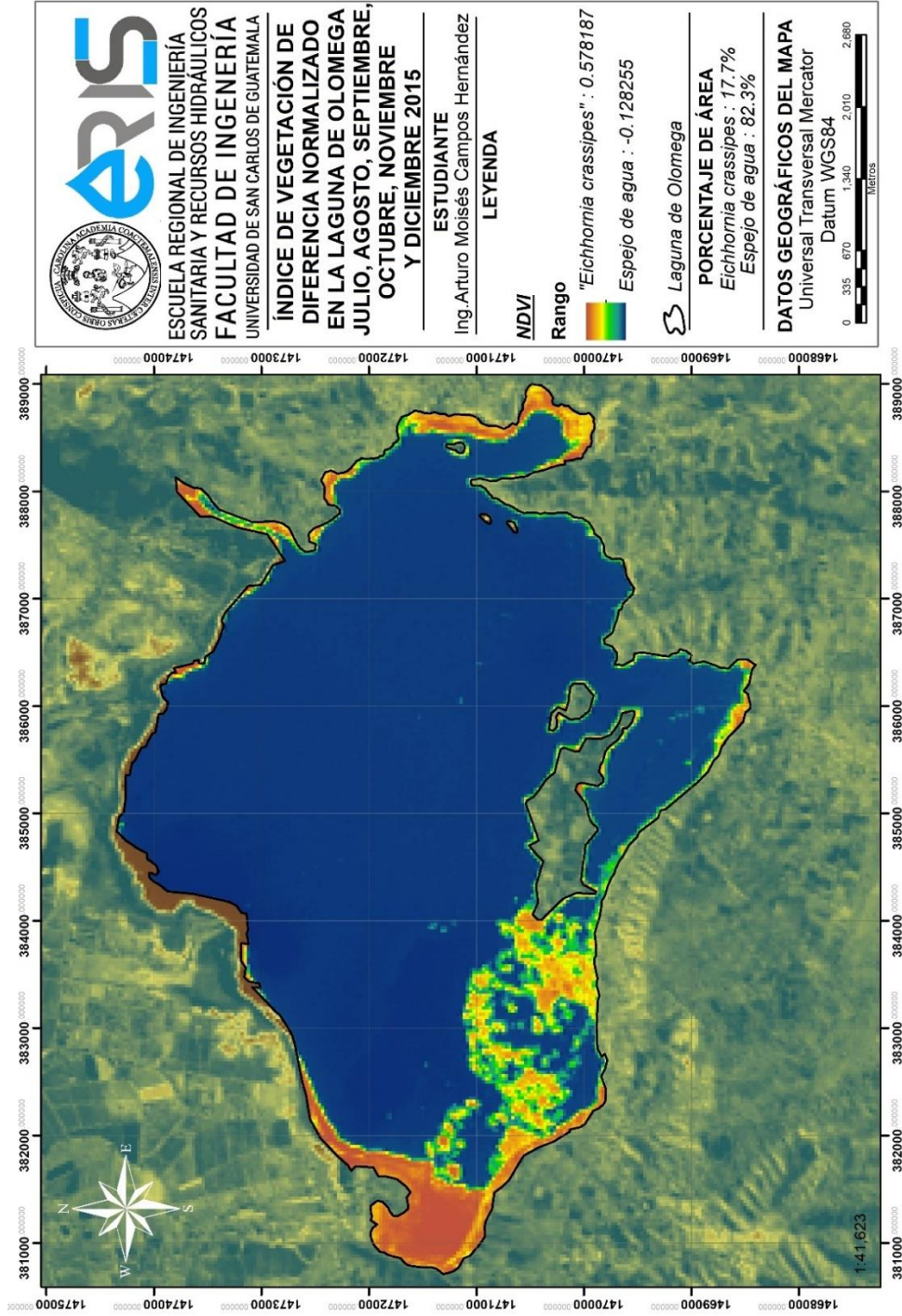
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 16. NDVI en laguna de Olomega, mayo y junio 2015



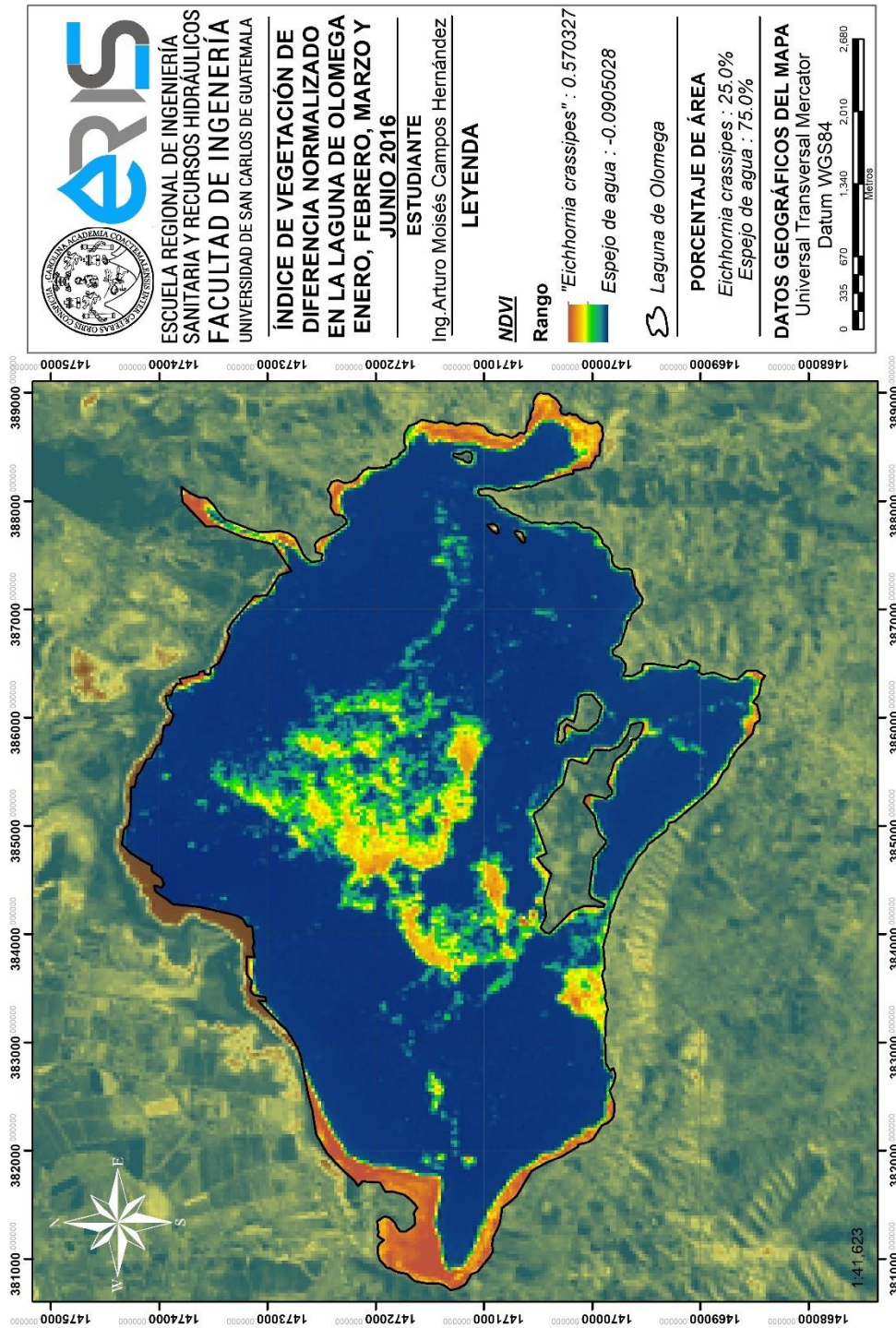
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 17. NDVI en laguna de Olomega, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre 2015



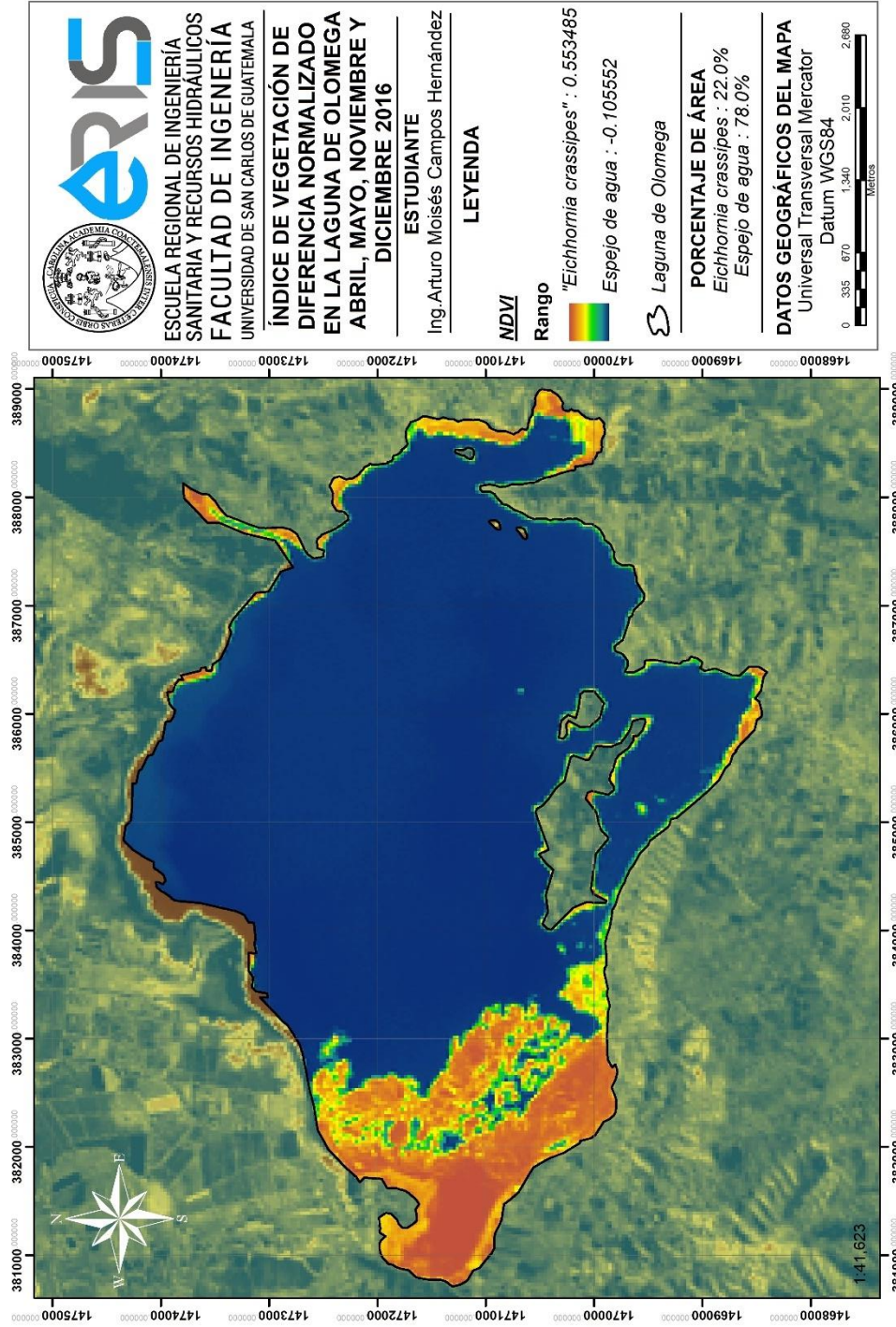
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 18. NDVI en laguna de Olomega, enero, febrero, marzo y junio 2016



Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

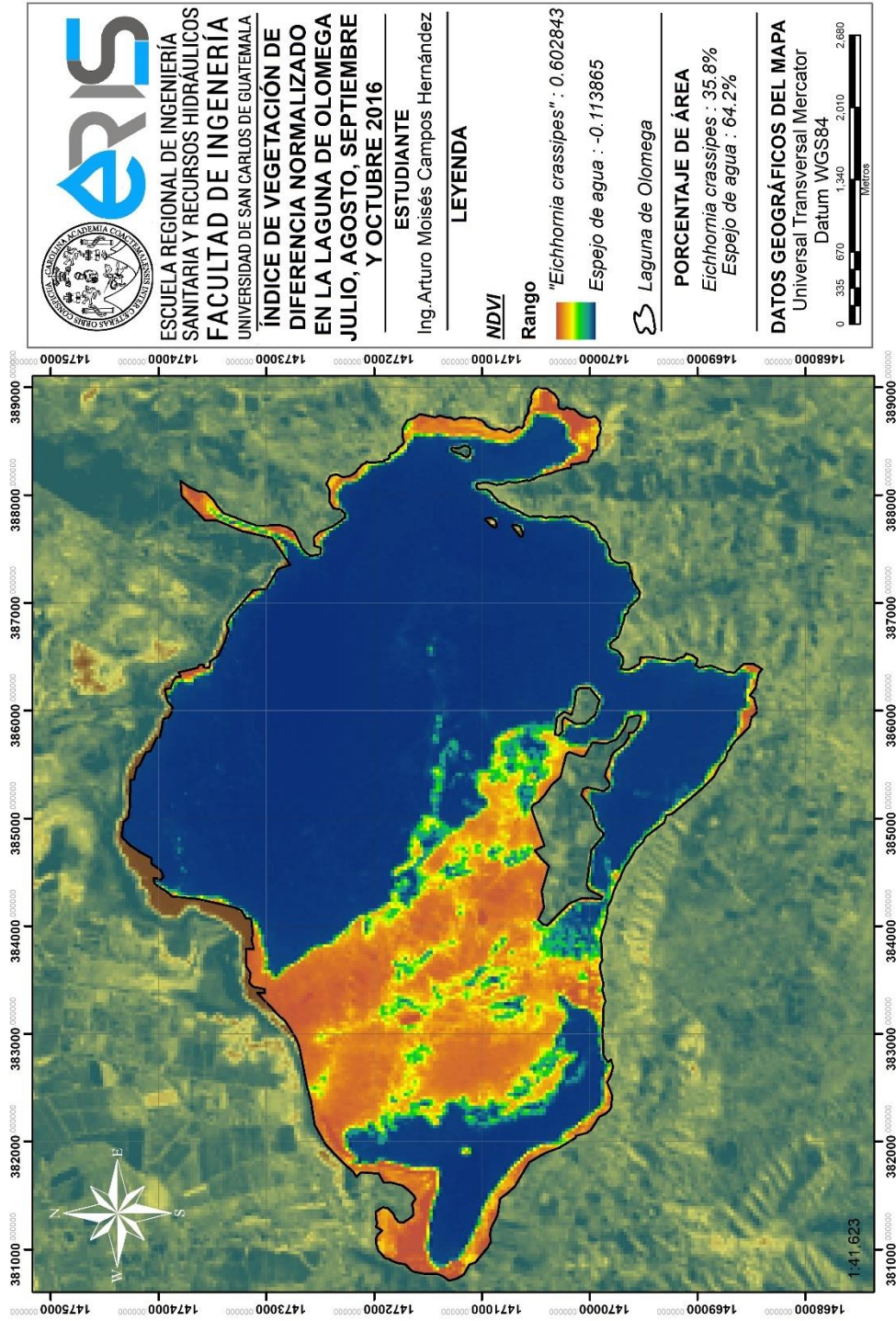
Apéndice 19. NDVI en laguna de Olomega, abril, mayo, noviembre y diciembre 2016



Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

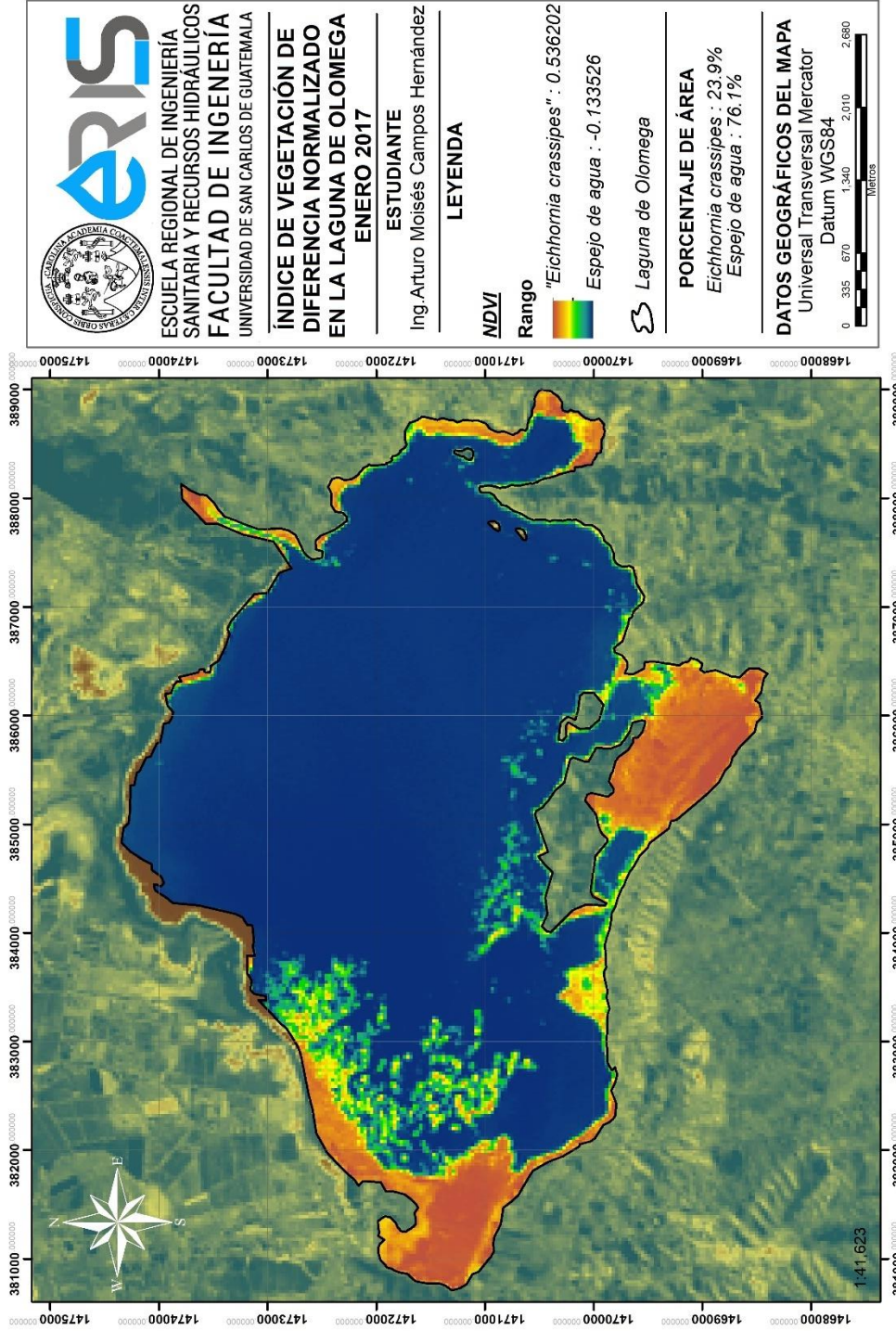


Apéndice 20. NDVI en laguna de Olomega, julio, agosto, septiembre y octubre 2016



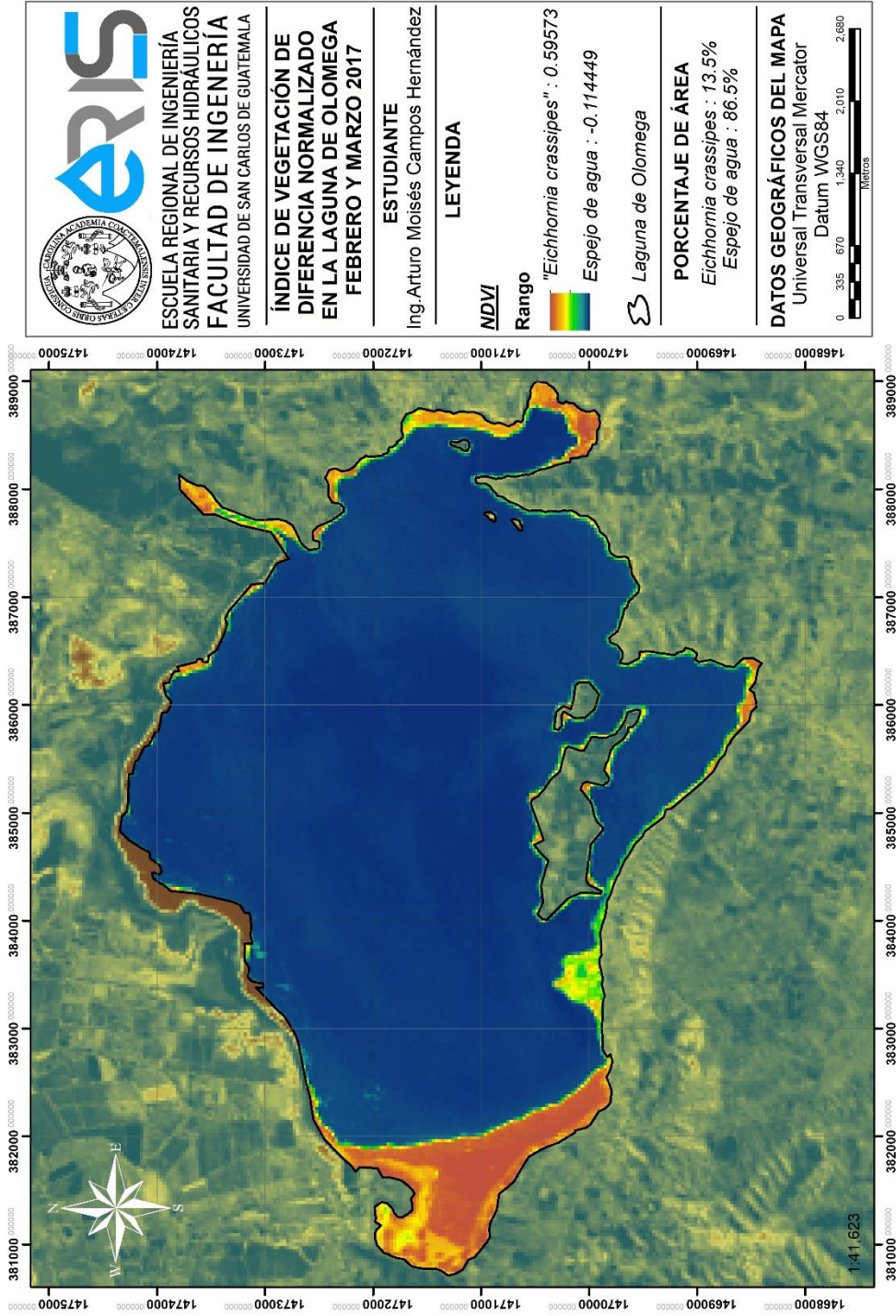
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

## Apéndice 21. NDVI en laguna de Olomega, enero 2017



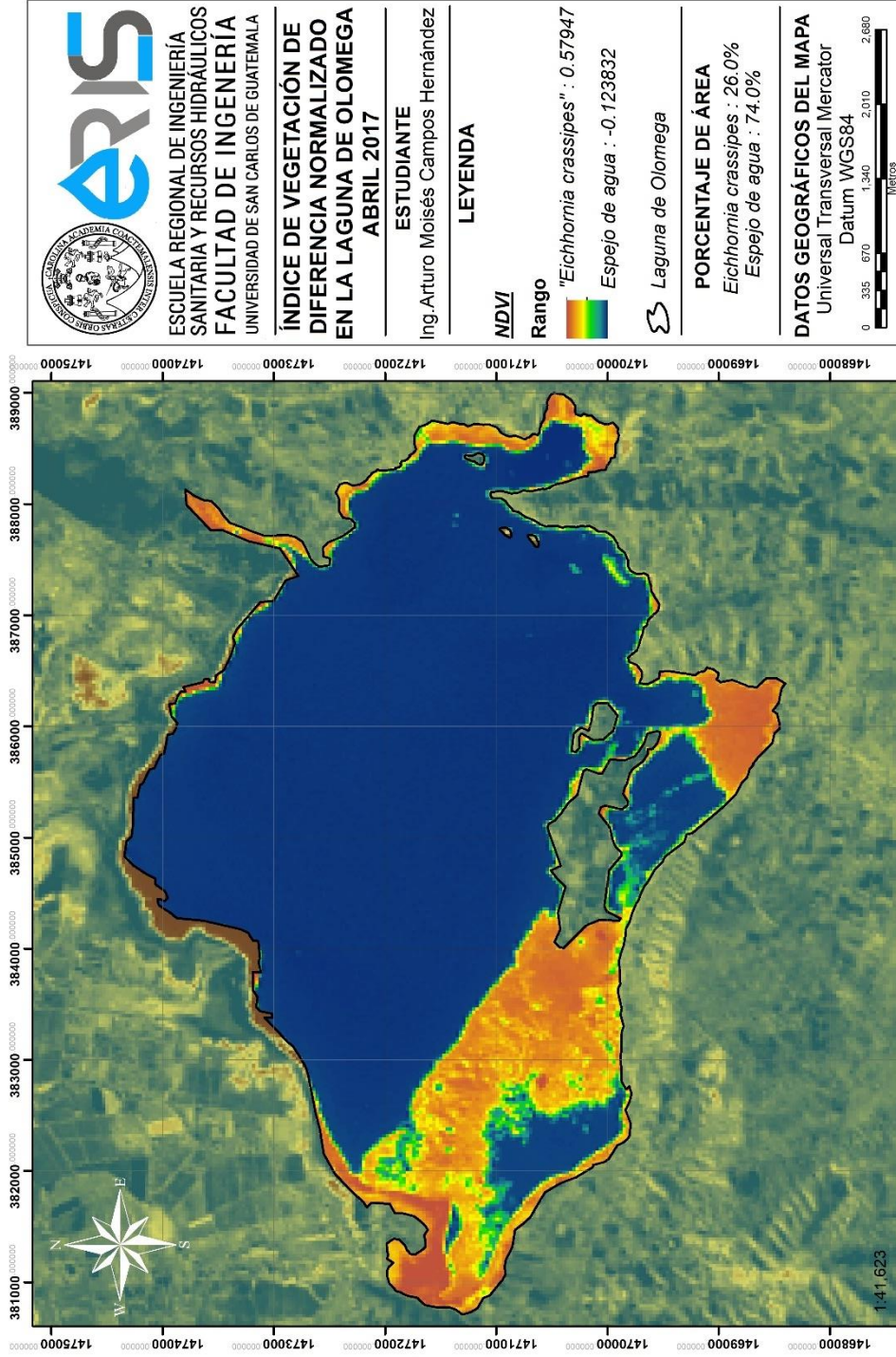
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 22. NDVI en laguna de Olomega, febrero y marzo 2017



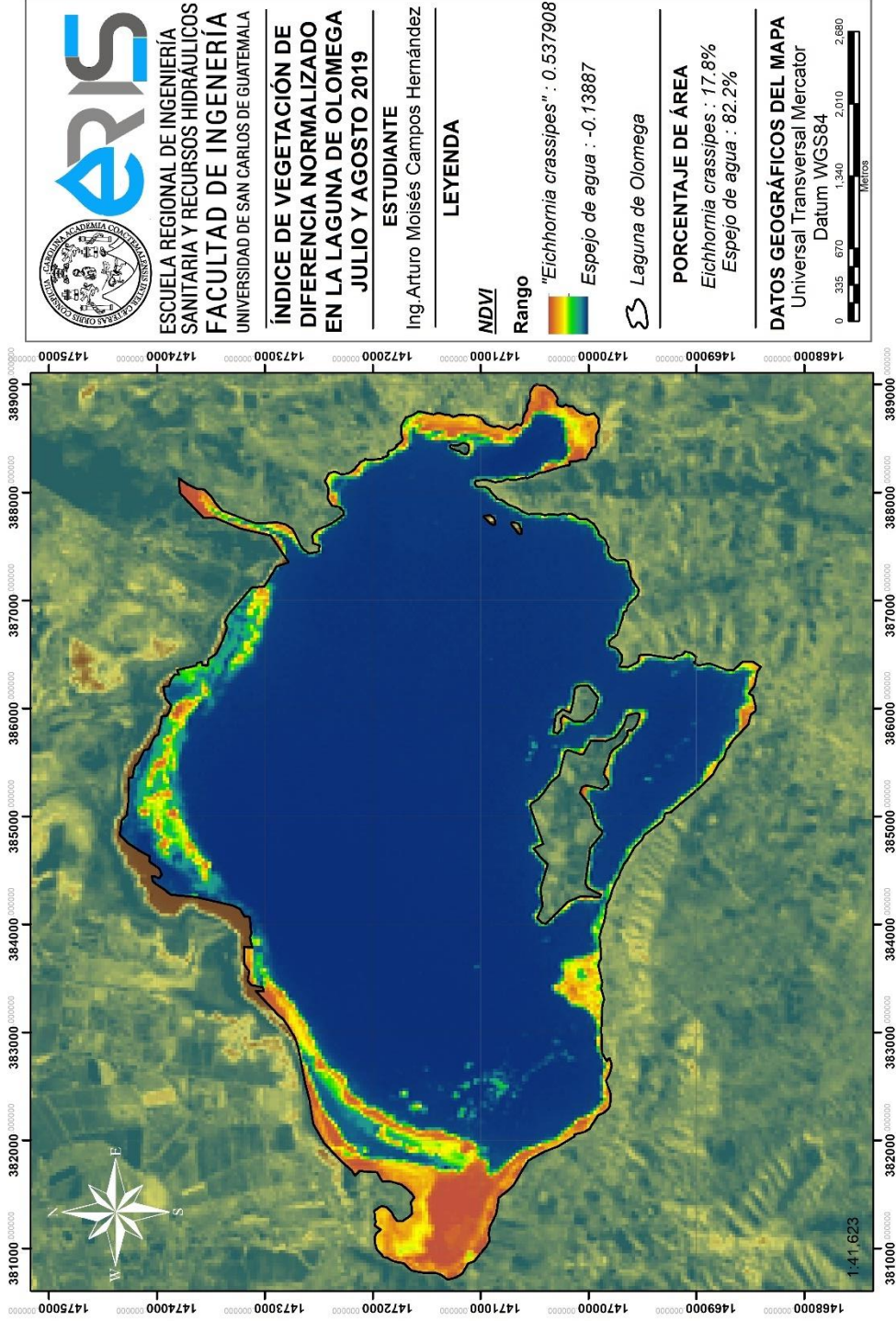
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 23. NDVI en laguna de Olomega, abril 2017



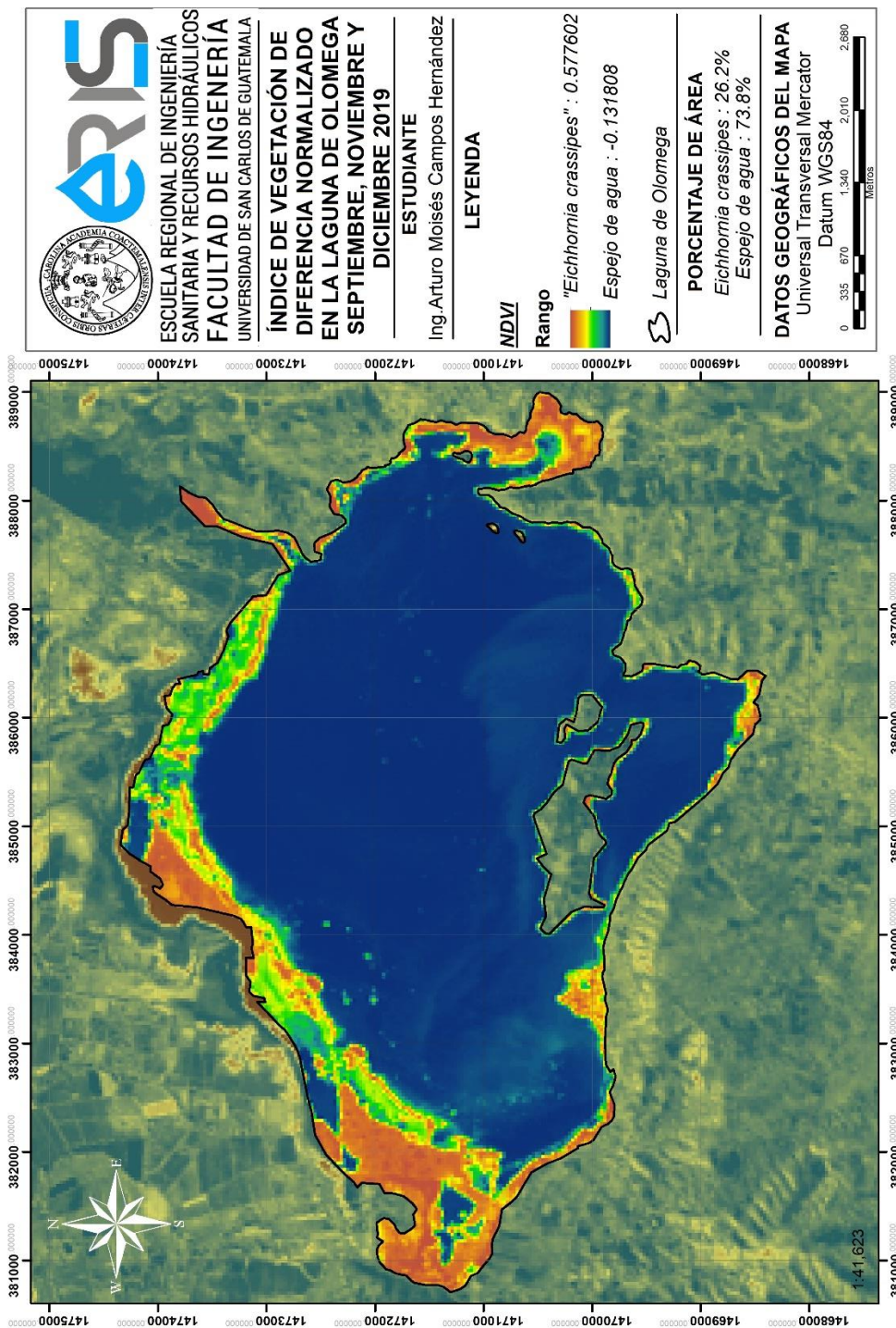
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 24. NDVI en laguna de Olomega, julio y agosto 2019



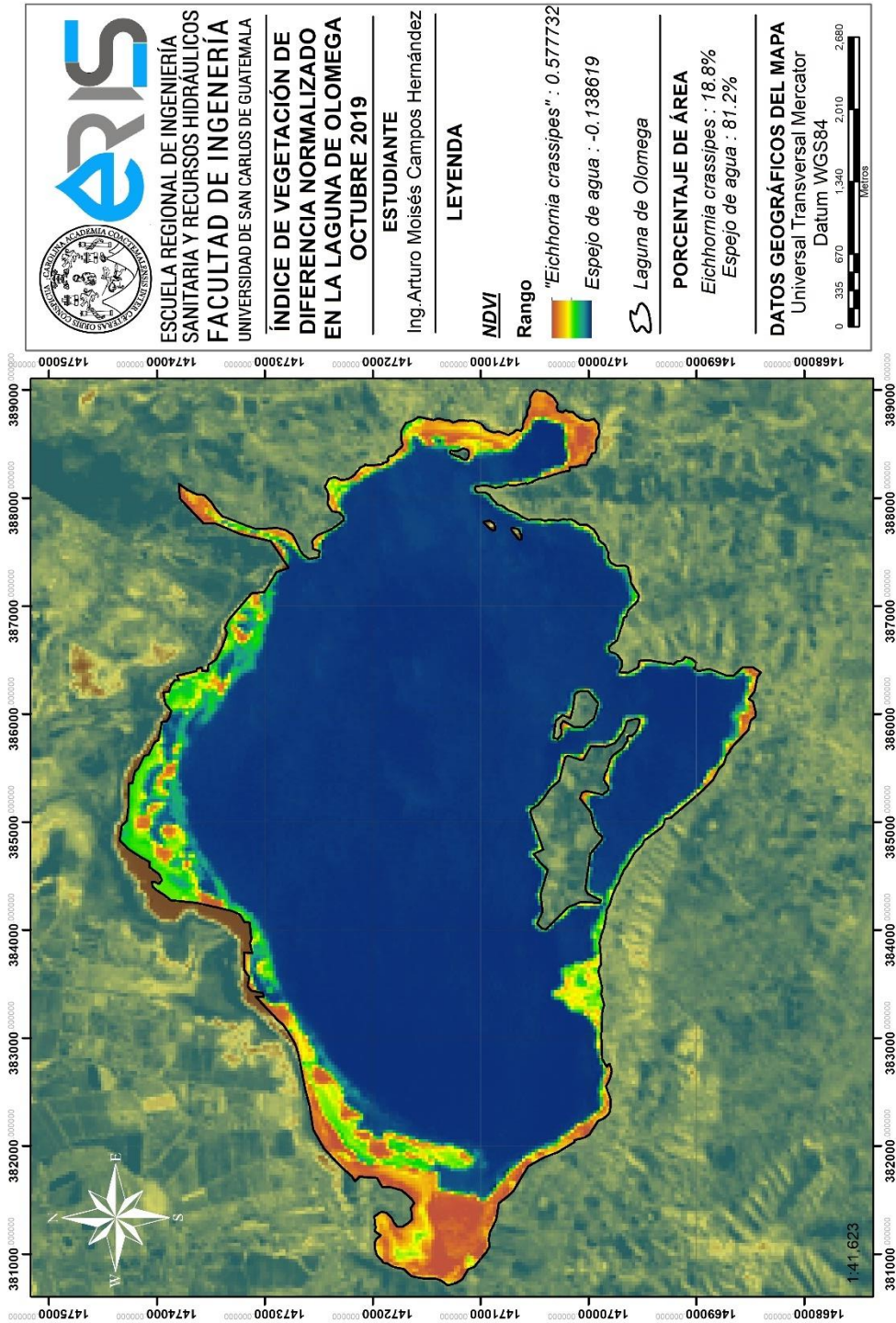
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 25. NDVI en laguna de Olomega, septiembre, noviembre y diciembre 2019



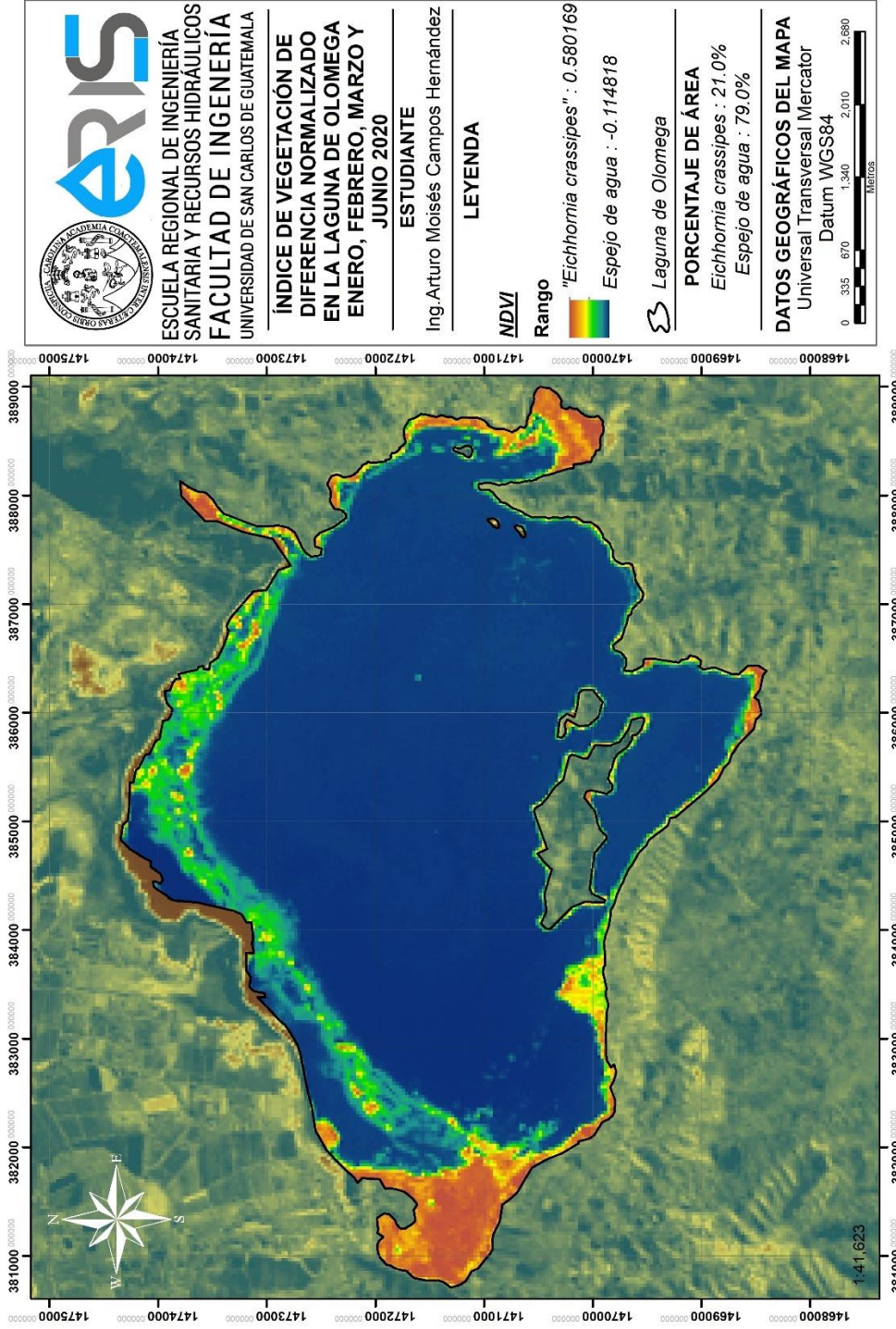
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 26. NDVI en laguna de Olomega, octubre 2019



Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

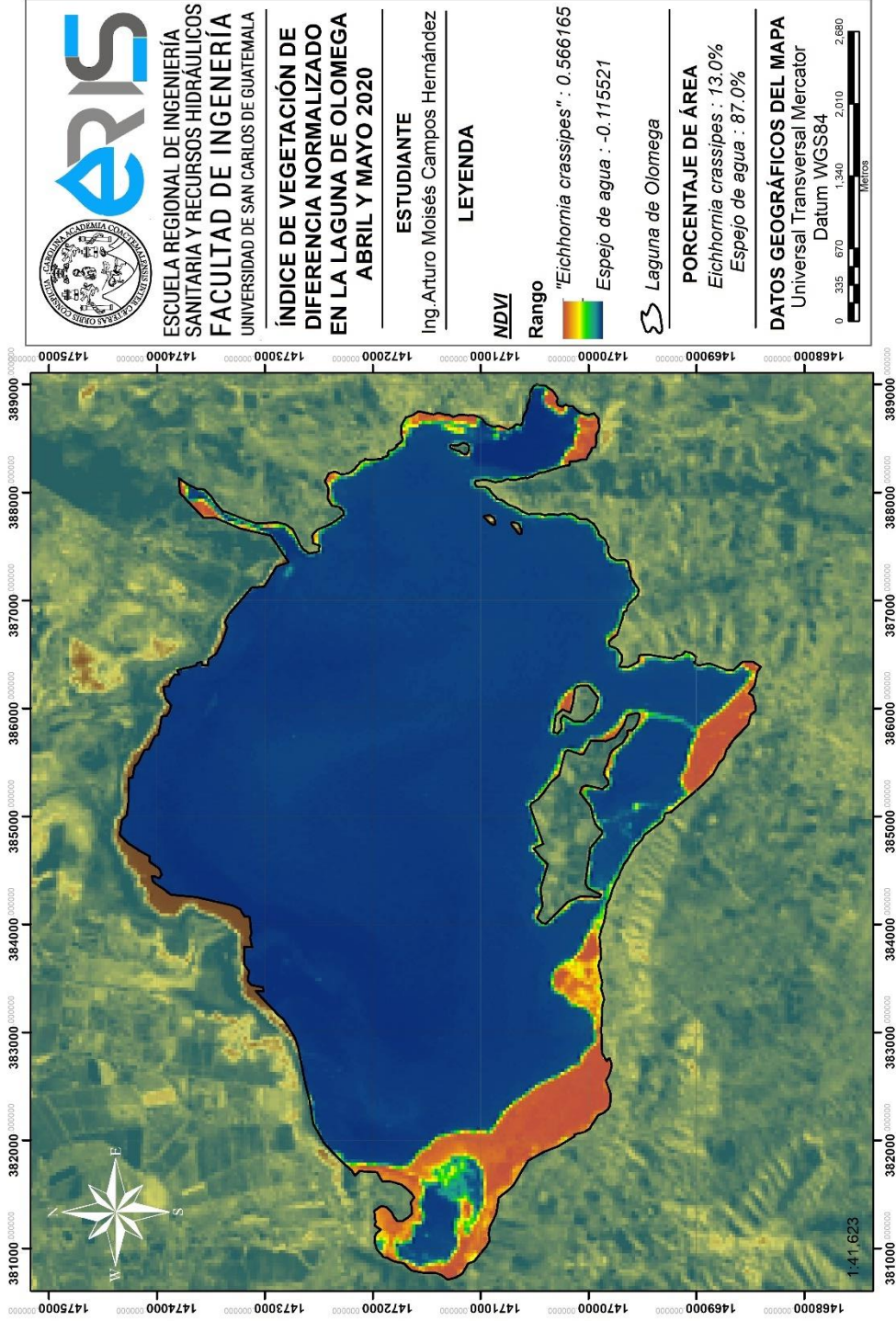
Apéndice 27. NDVI en laguna de Olomega, enero, febrero, marzo y junio 2020



Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

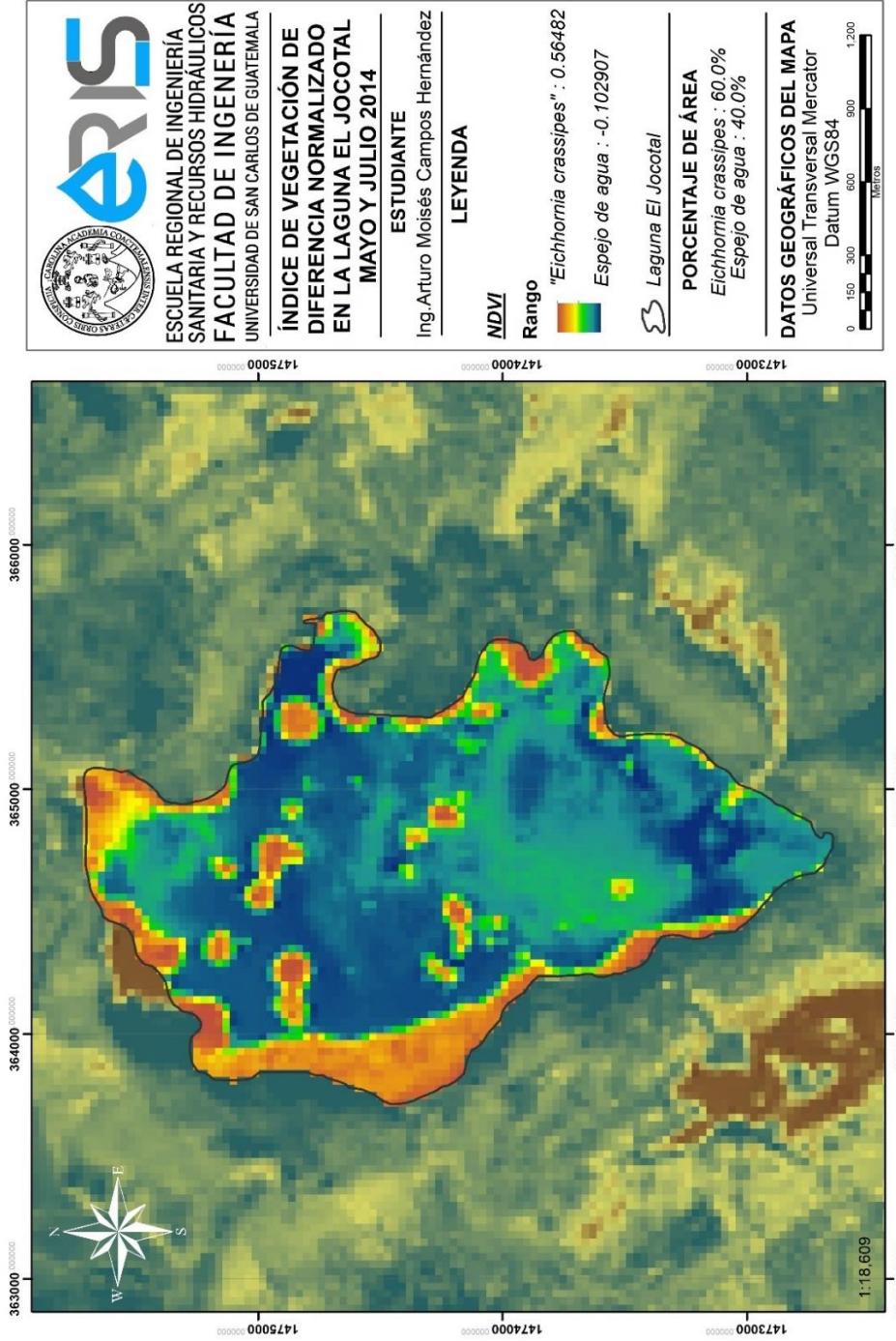


Apéndice 28. NDVI en laguna de Olomega, abril y mayo 2020



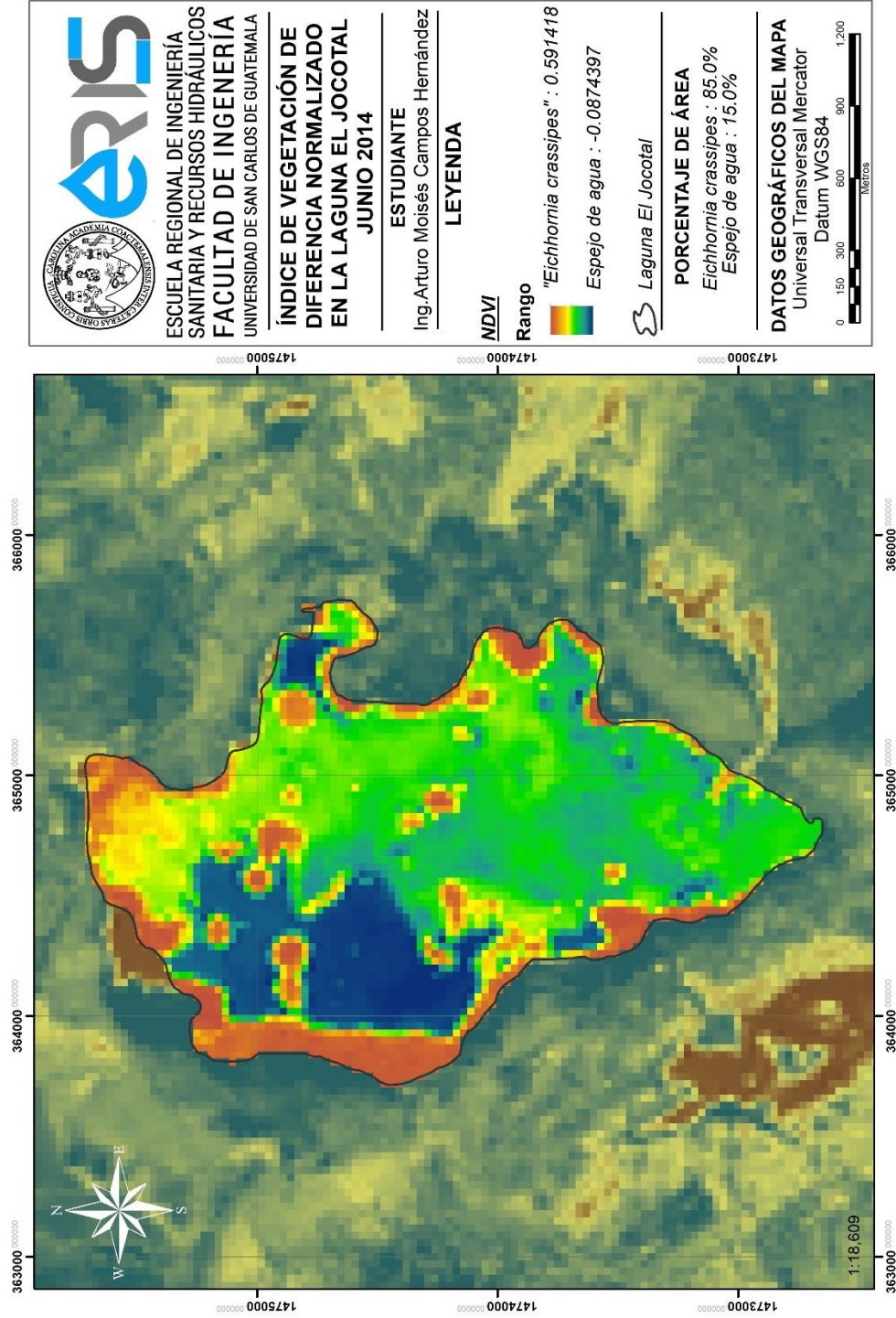
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 29. NDVI en laguna de El Jocotal, mayo y julio 2014



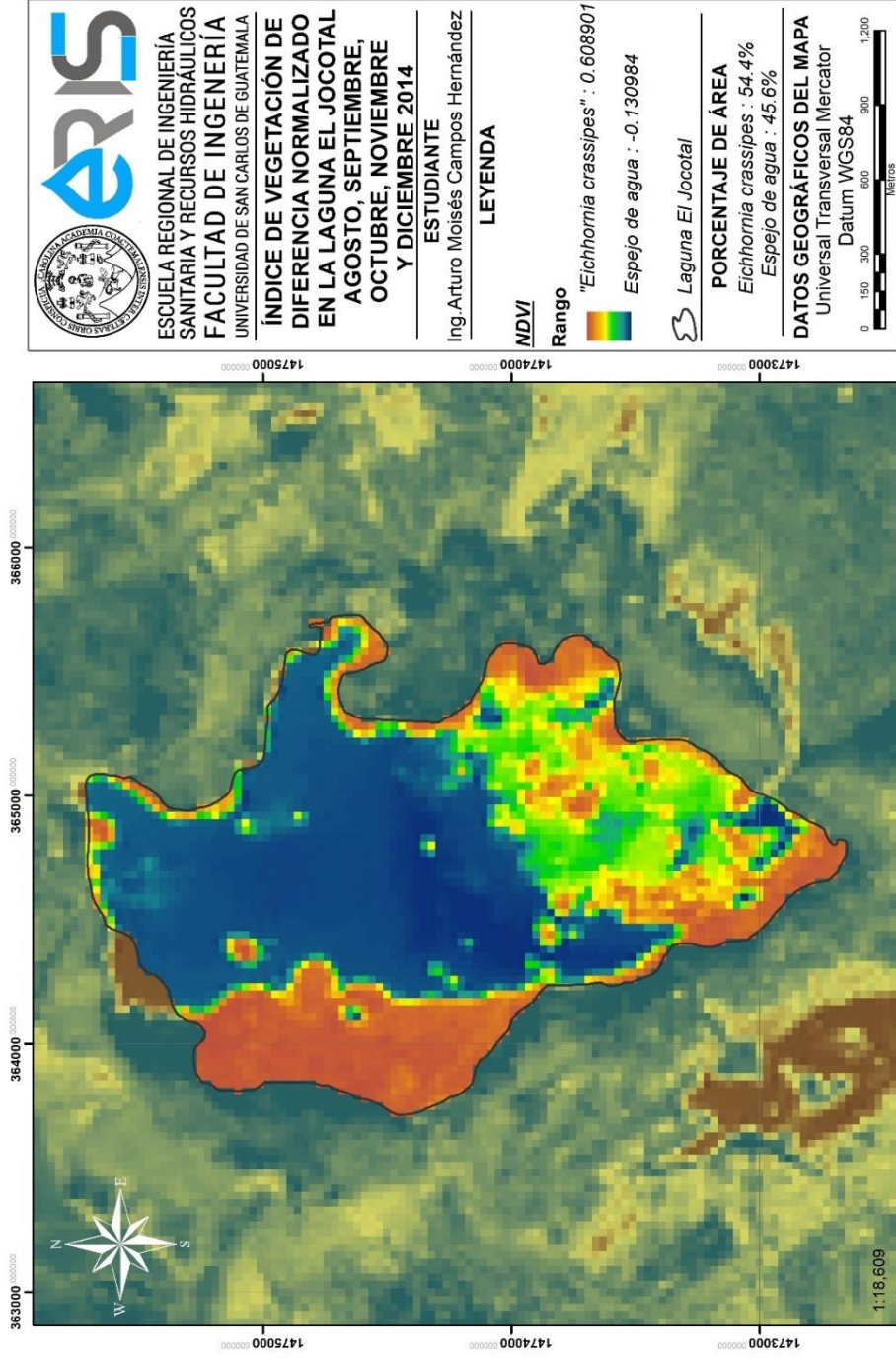
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 30. NDVI en laguna El Jocotal, junio 2014



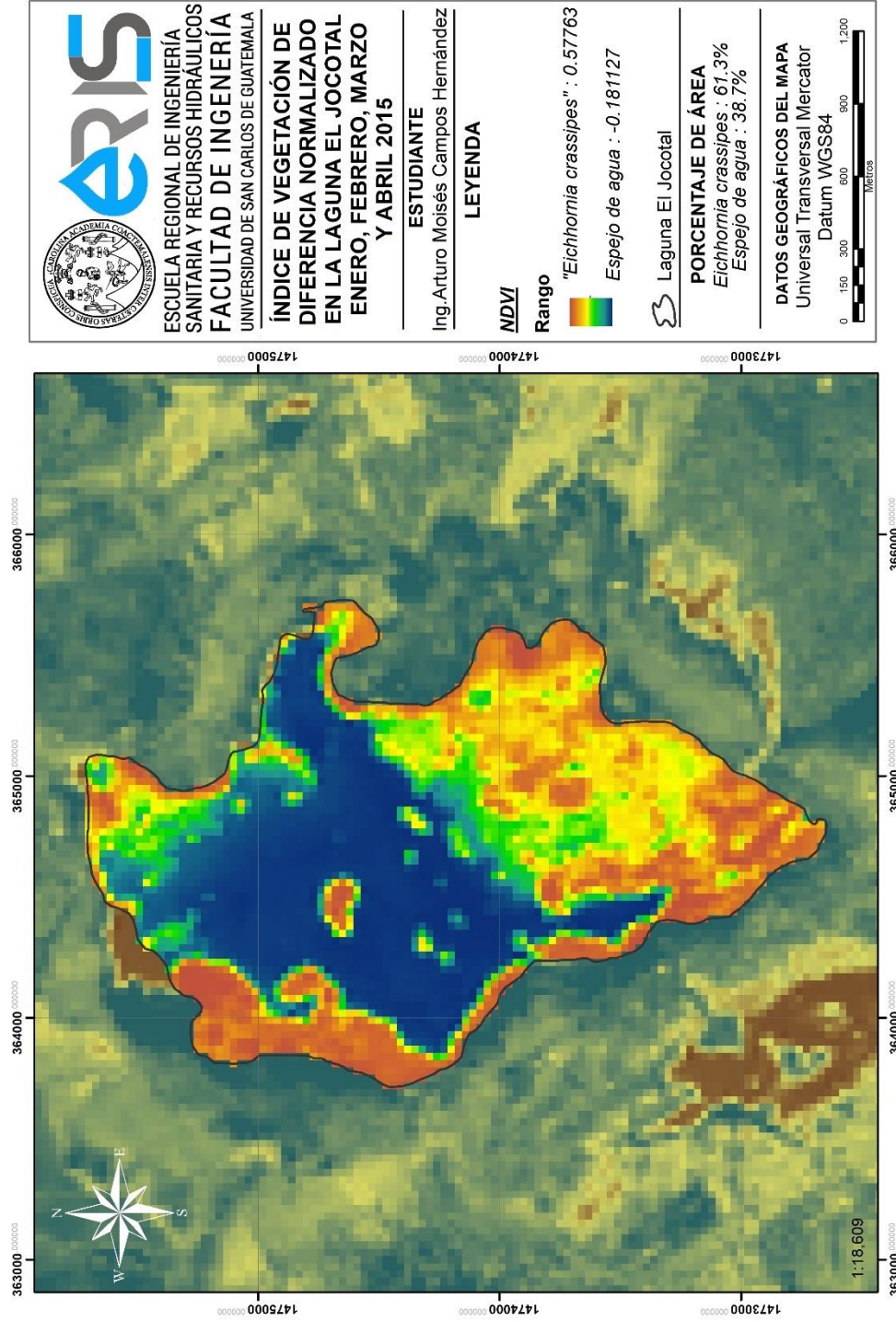
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 31. NDVI en laguna El Jocotal, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre 2014



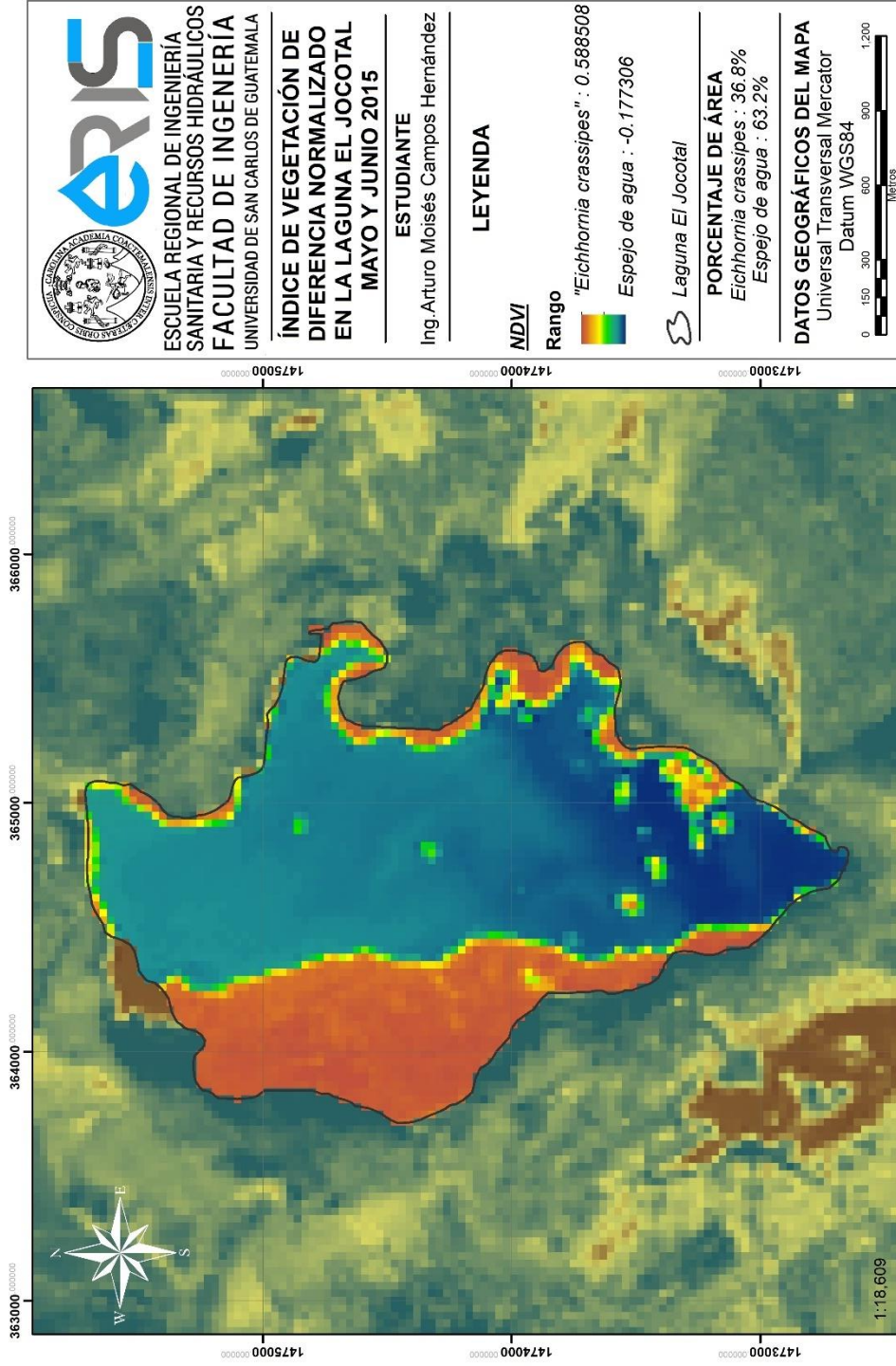
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 32. NDVI en laguna El Jocotal, enero, febrero, marzo y abril 2015



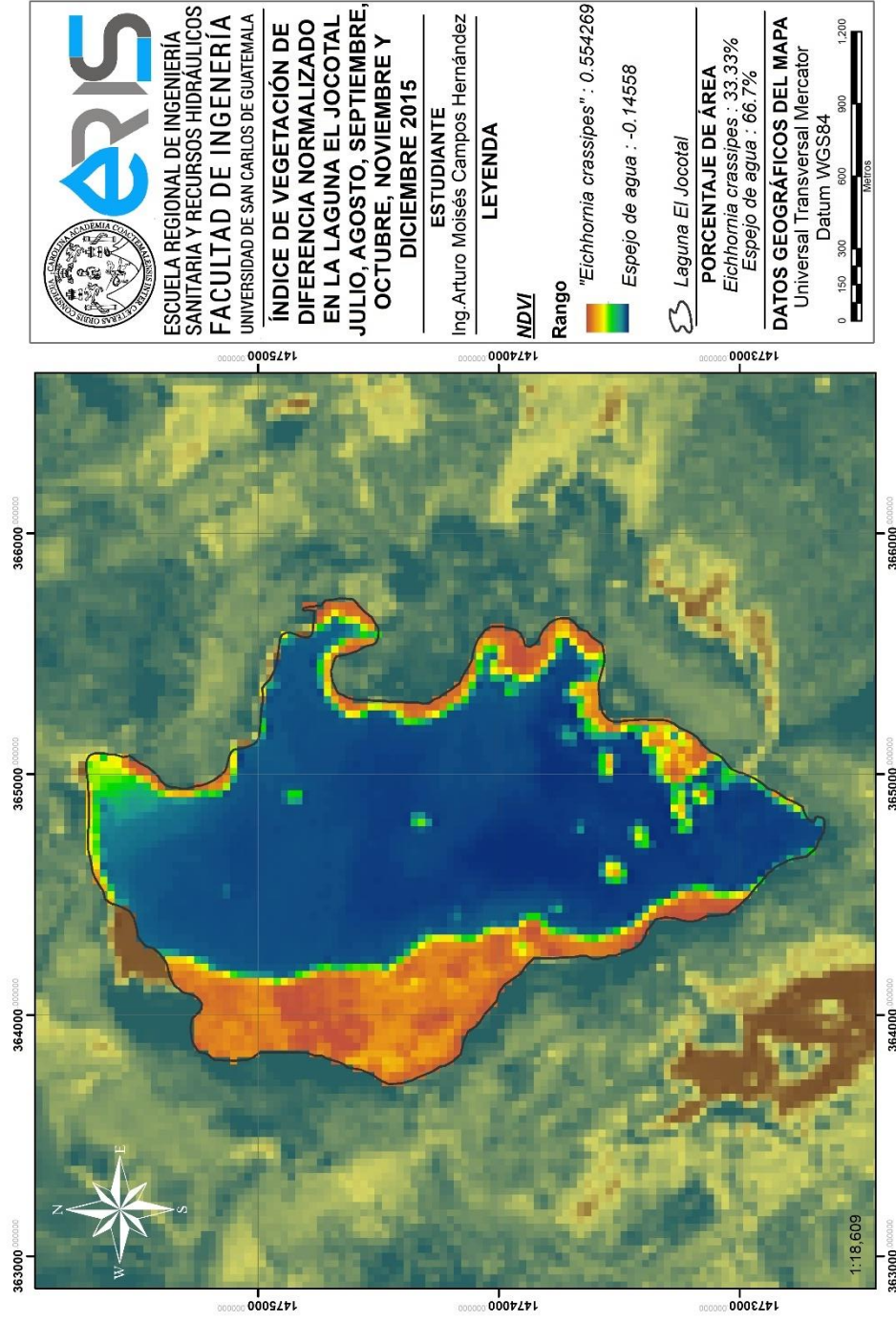
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 33. NDVI en laguna El Jocotal, mayo y junio 2015



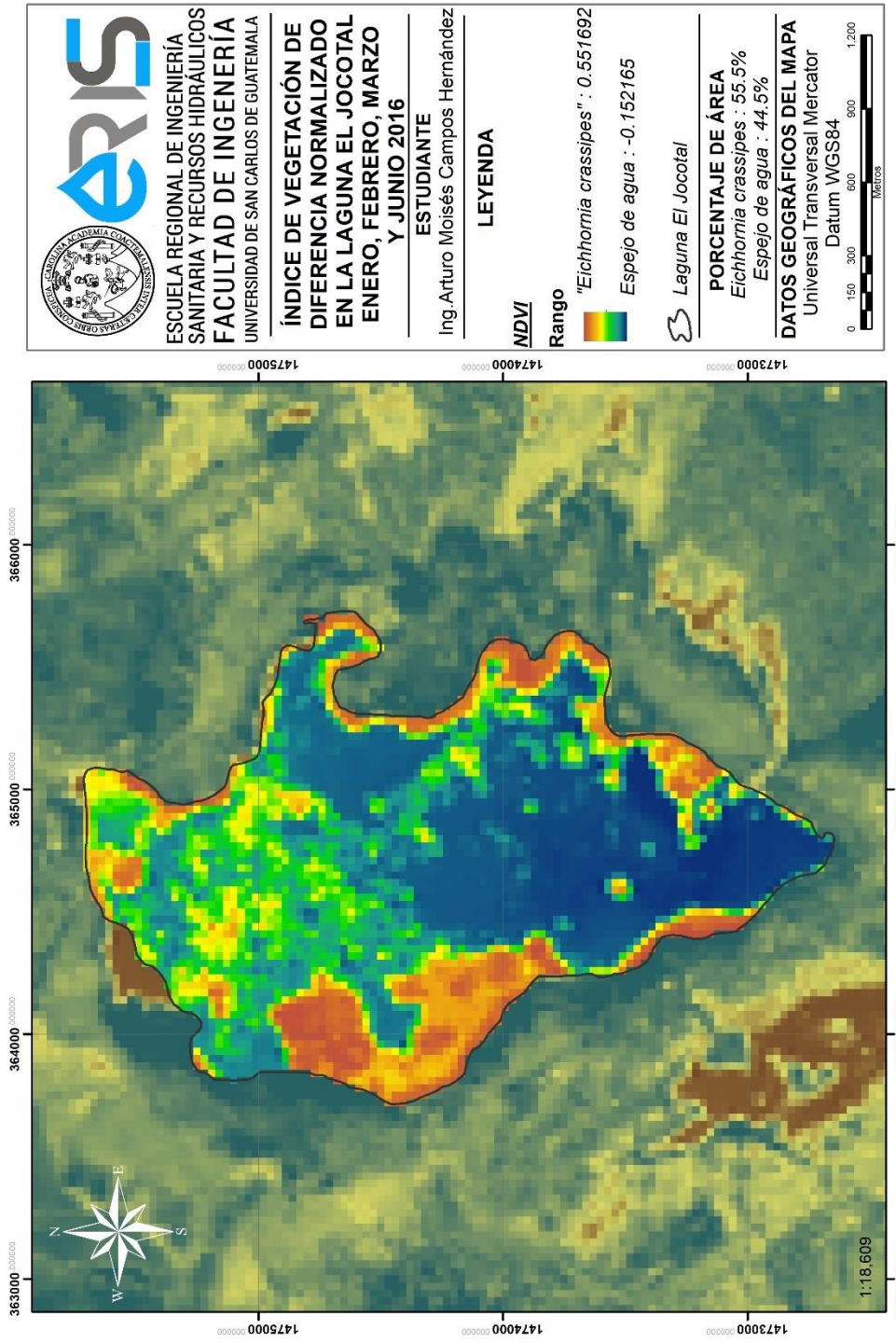
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 34. NDVI en laguna El Jocotal, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre 2015



Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

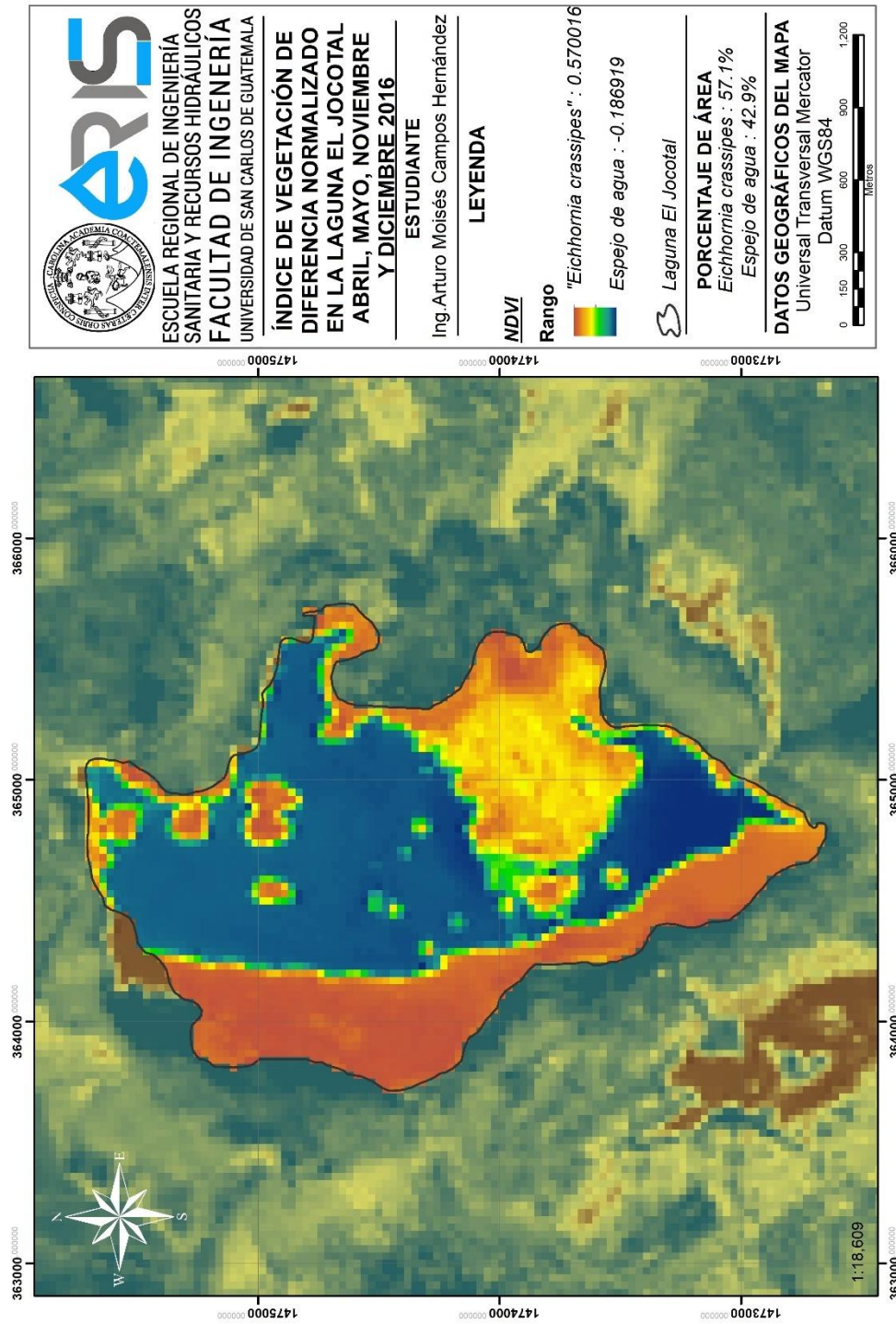
Apéndice 35. NDVI en laguna El Jocotal, enero, febrero, marzo y junio 2016



Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

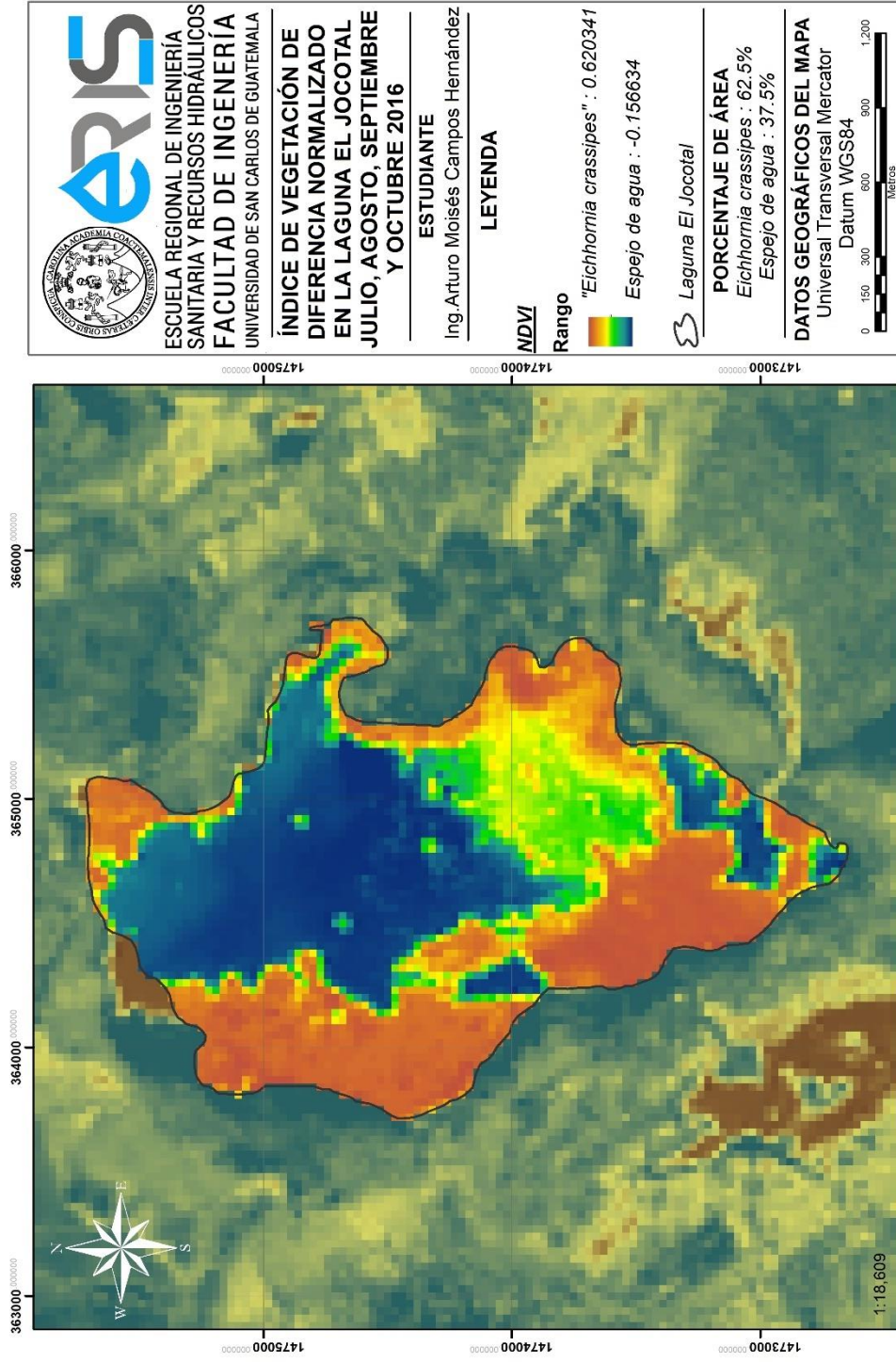


Apéndice 36. NDVI en laguna El Jocotal, abril, mayo, noviembre y diciembre 2016



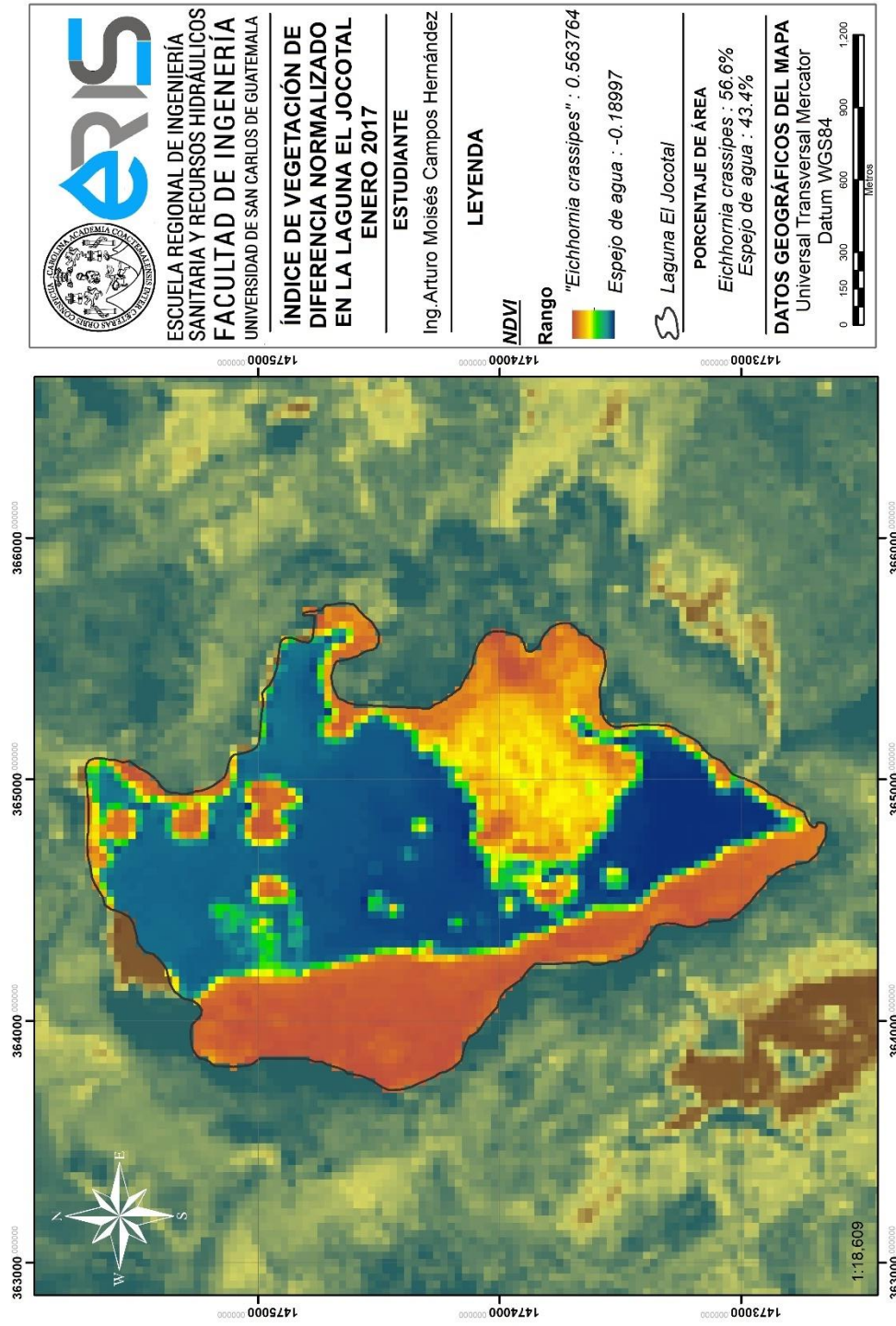
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 37. NDVI en laguna El Jocotal, julio, agosto, septiembre y octubre 2016



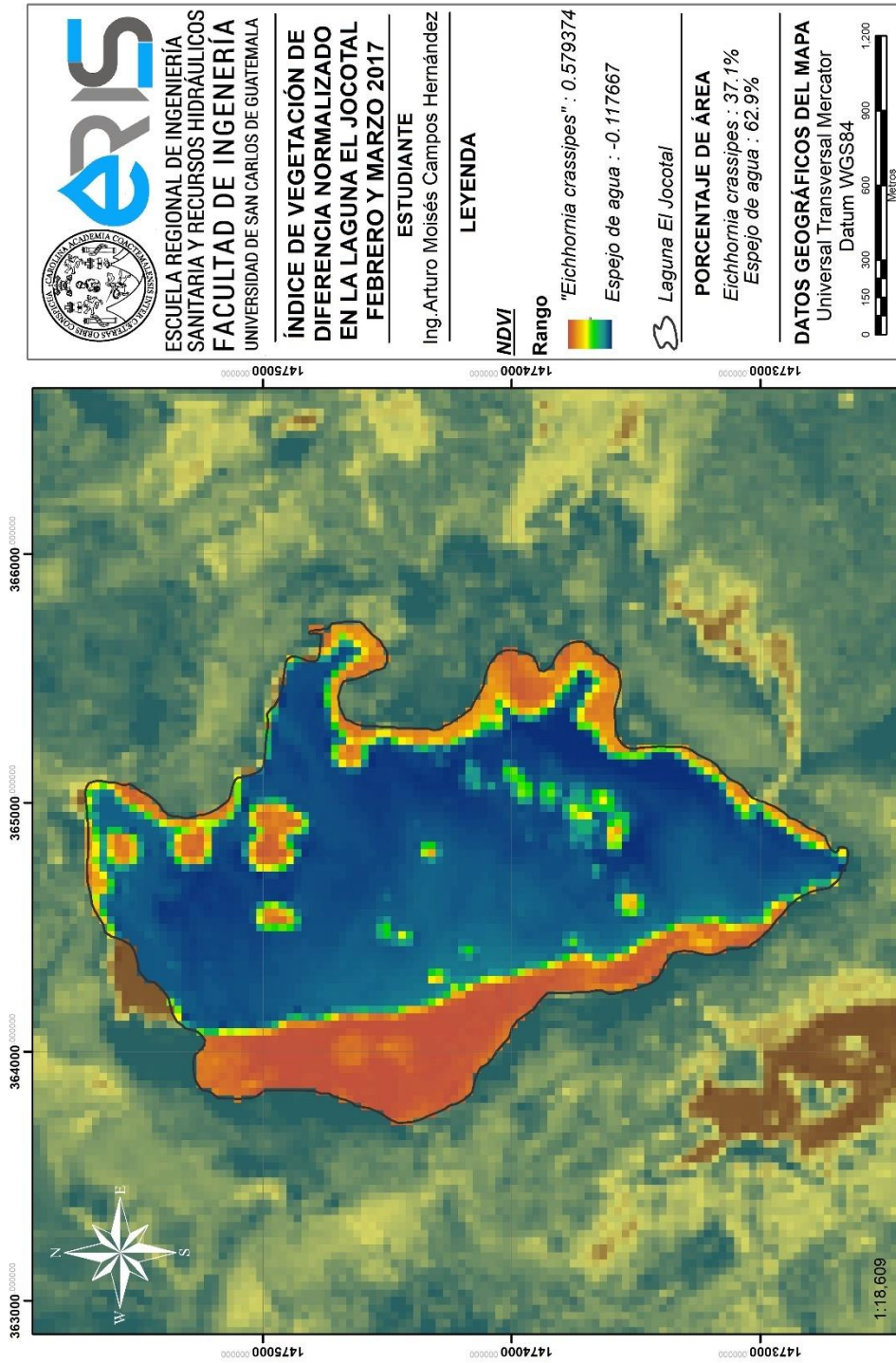
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 38. NDVI en laguna El Jocotal, enero 2017



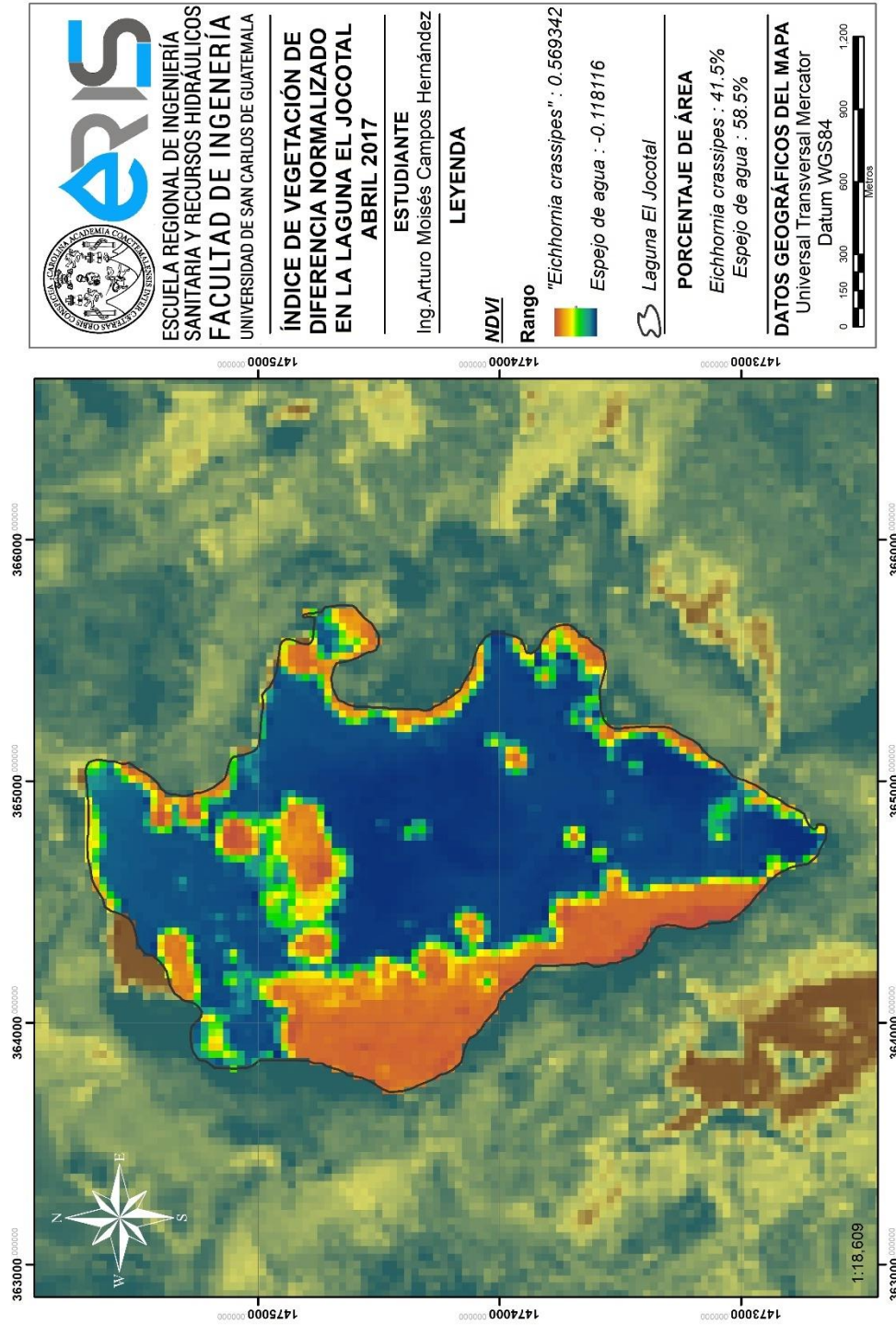
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 39. NDVI en laguna de Olomega, febrero y marzo 2017



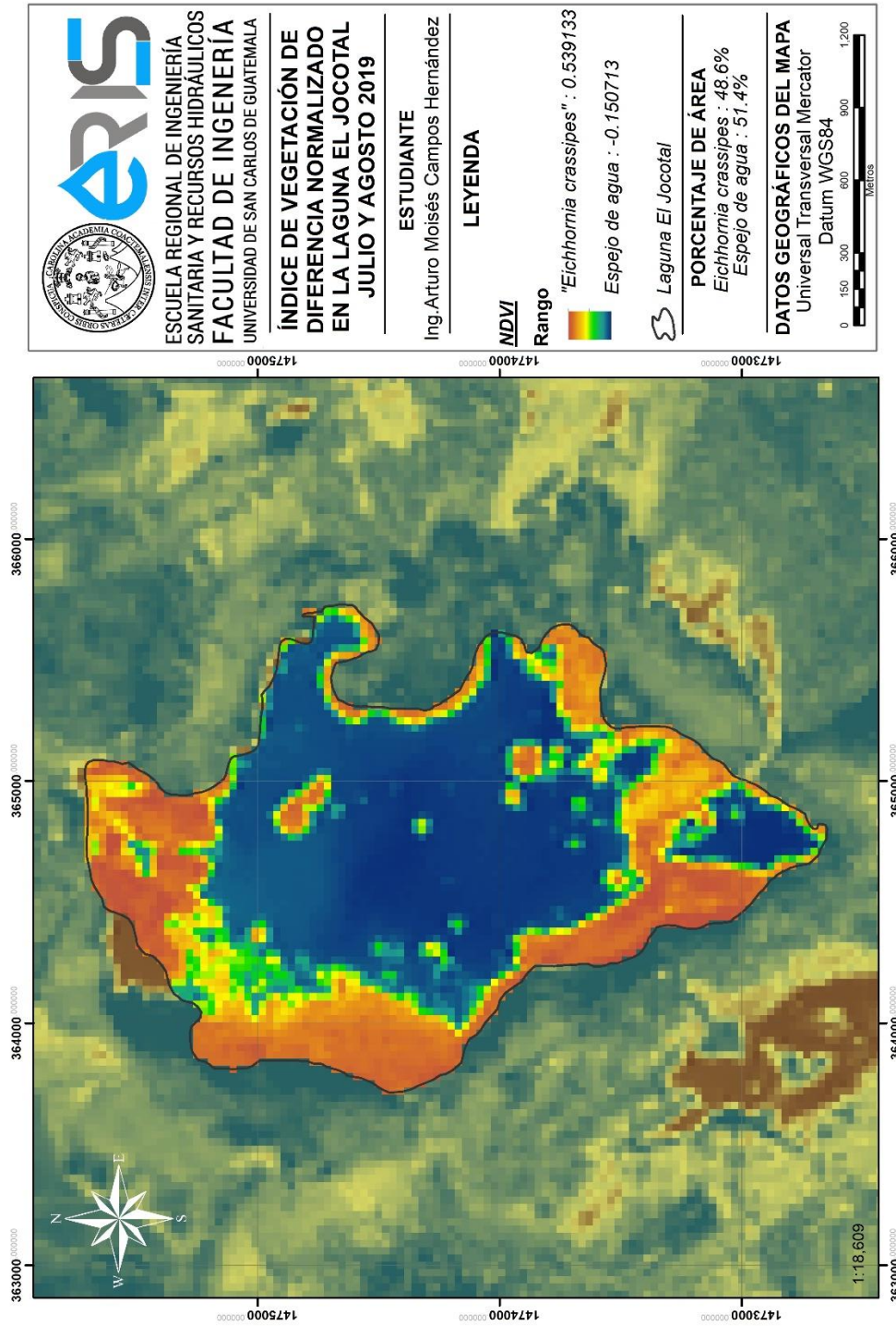
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 40. NDVI en laguna El Jocotal, abril 2017



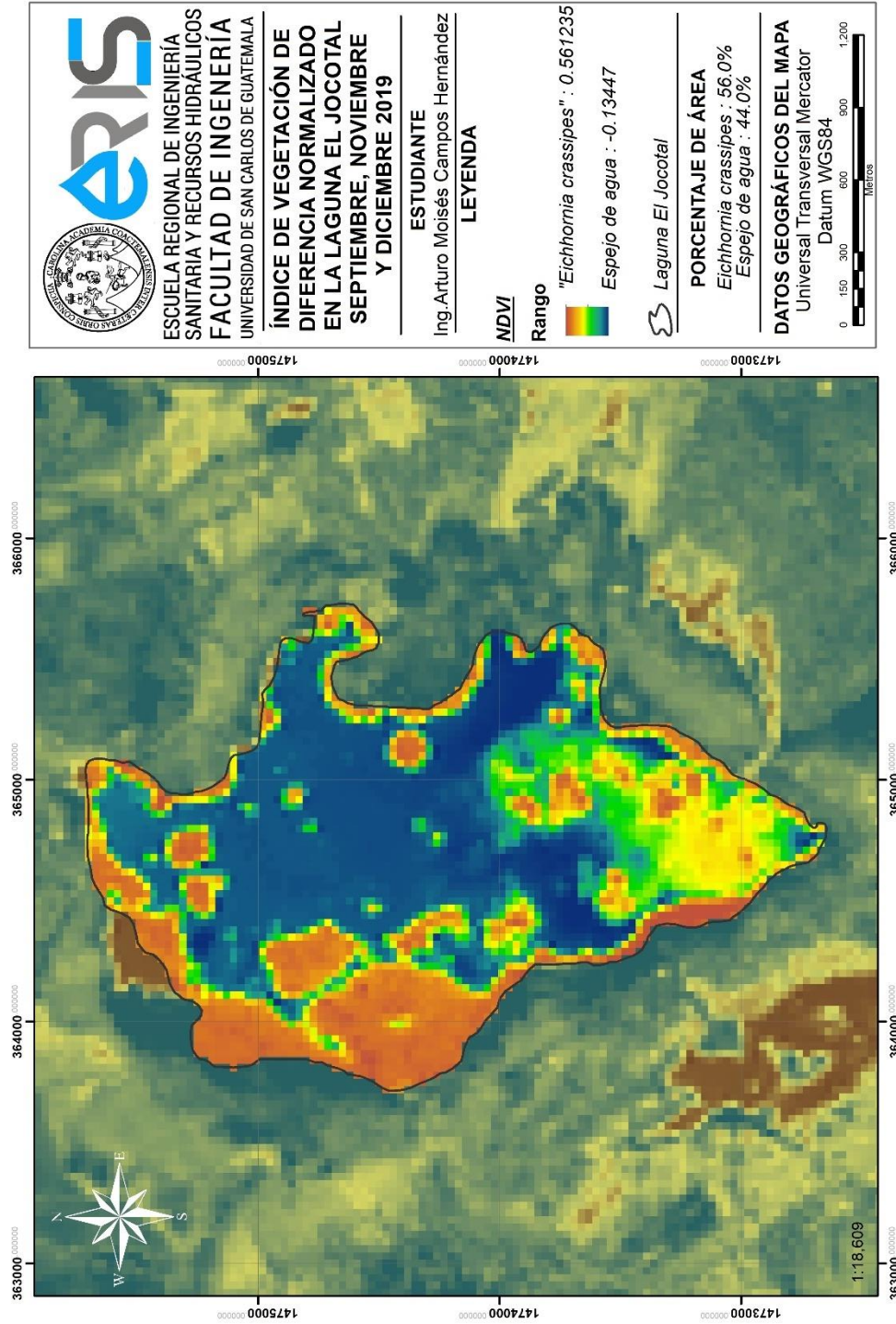
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 4.1. NDVI en laguna El Jocotal, julio y agosto 2019



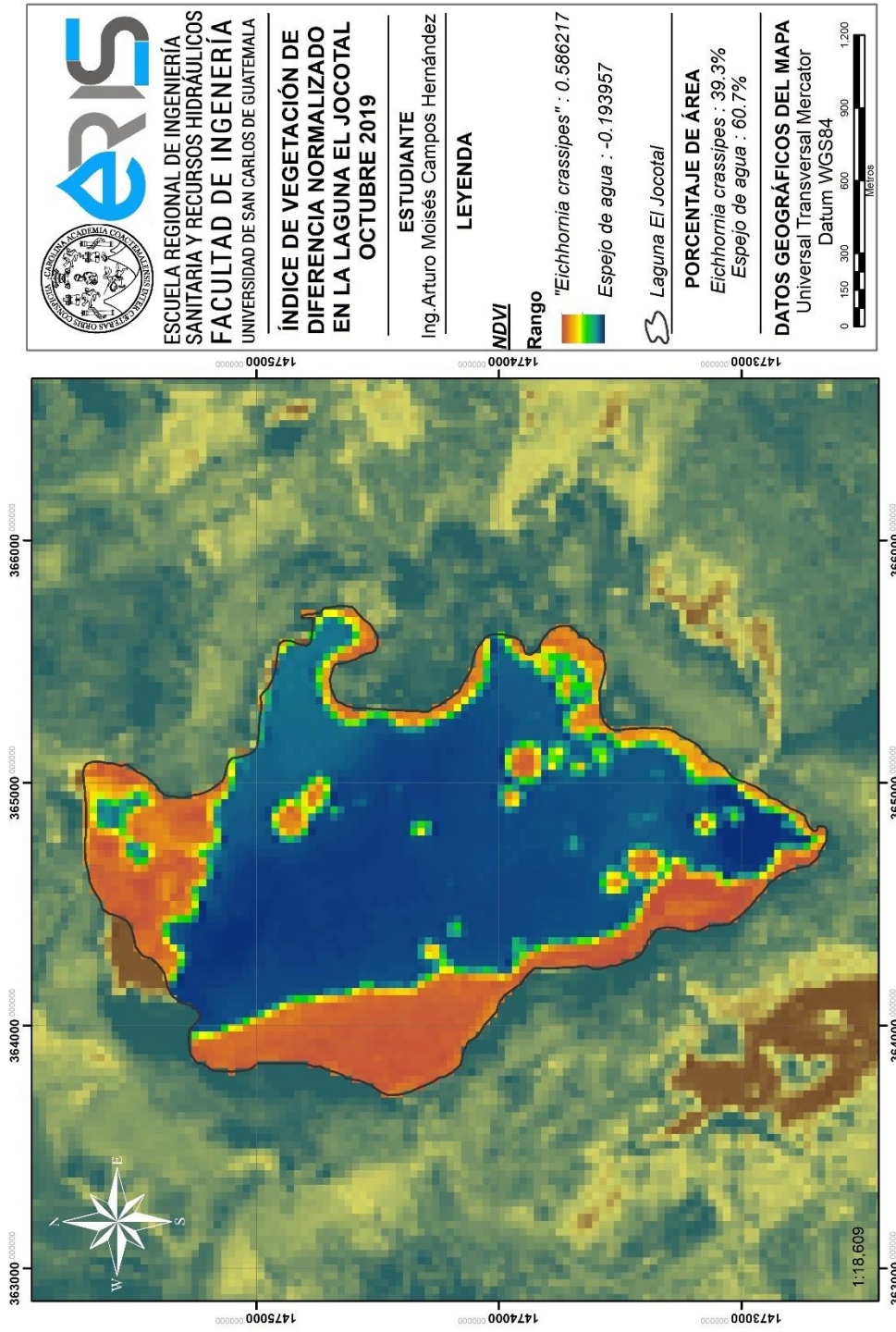
Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 42. NDVI en laguna El Jocotal, septiembre, noviembre y diciembre 2019



Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

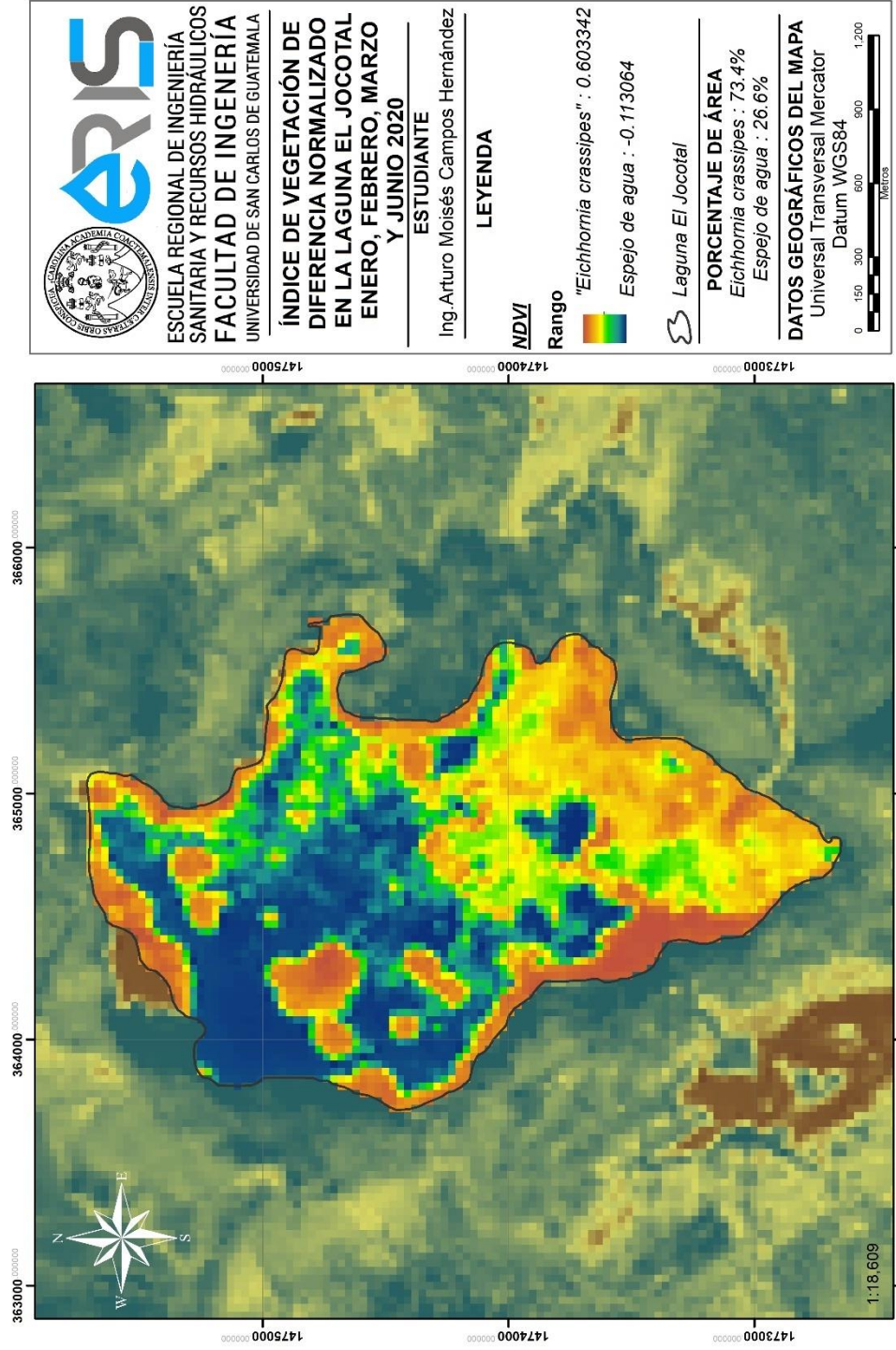
Apéndice 43. NDVI en laguna El Jocotal, octubre 2019



Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

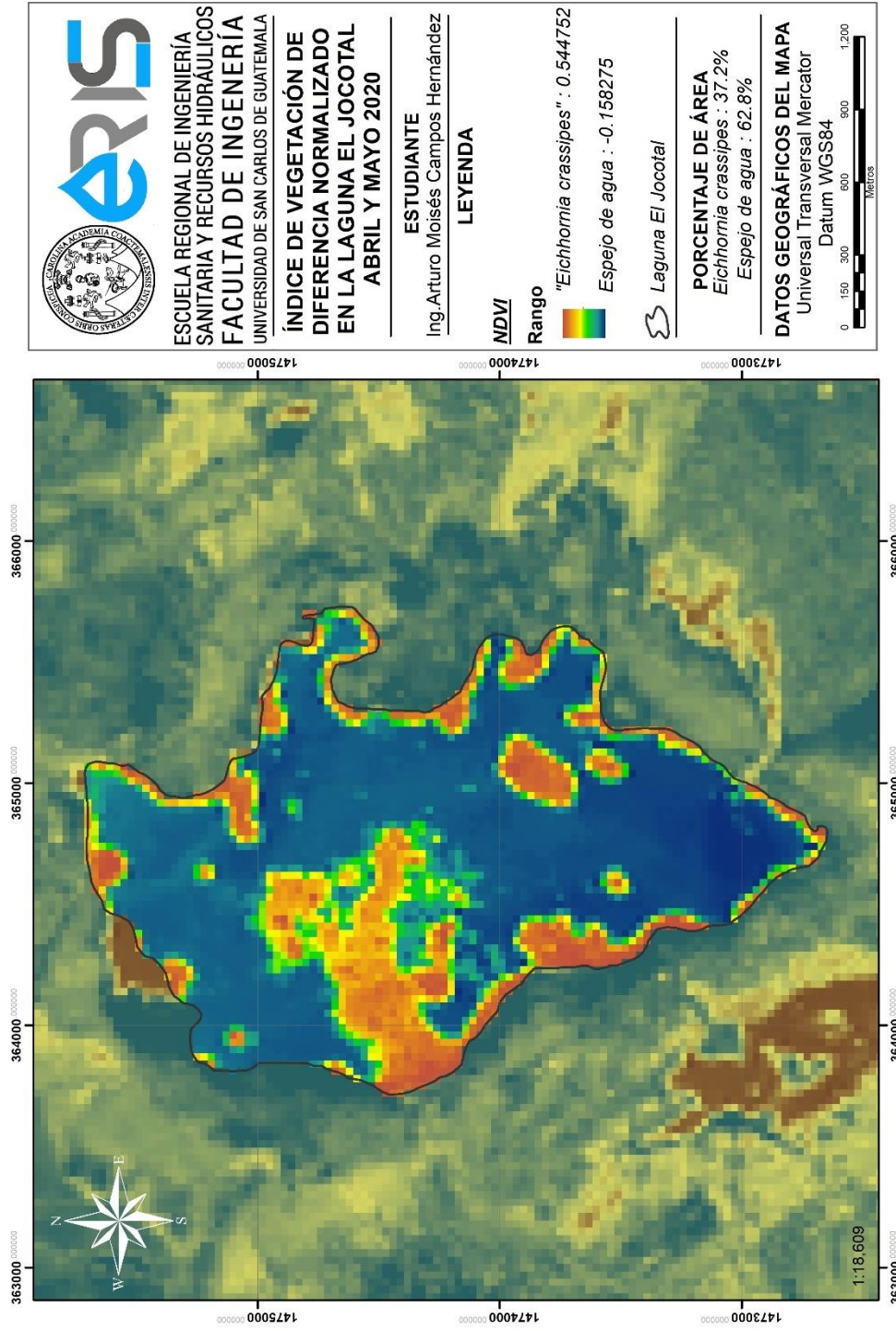


Apéndice 44. NDVI en laguna El Jocotal, enero, febrero, marzo y junio 2020



Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 45. NDVI en laguna El Jocotal, abril y mayo 2020



Fuente. Elaboración propia, usando ArcGIS 10.8.

Apéndice 46. **Matriz de transición abril a mayo 2014, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b> | <b>Espejo de agua</b> | <b>Eichhornia crassipes</b> | <b>Total</b> |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|
| <b>Espejo de agua</b>       | <b>1,793</b>          | 28                          | <b>1,822</b> |
| <b>Eichhornia crassipes</b> | 344                   | <b>310</b>                  | <b>653</b>   |
| <b>Total</b>                | <b>2,137</b>          | <b>338</b>                  |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 47. **Matriz de transición mayo a junio 2014, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b> | <b>Espejo de agua</b> | <b>Eichhornia crassipes</b> | <b>Total</b> |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|
| <b>Espejo de agua</b>       | <b>1,793</b>          | 344                         | <b>2,137</b> |
| <b>Eichhornia crassipes</b> | 28                    | <b>310</b>                  | <b>338</b>   |
| <b>Total</b>                | <b>1,822</b>          | <b>653</b>                  |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 48. **Matriz de transición junio a julio 2014, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b> | <b>Espejo de agua</b> | <b>Eichhornia crassipes</b> | <b>Total</b> |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|
| <b>Espejo de agua</b>       | <b>1,793</b>          | 28                          | <b>1,822</b> |
| <b>Eichhornia crassipes</b> | 344                   | <b>310</b>                  | <b>653</b>   |
| <b>Total</b>                | <b>2,137</b>          | <b>338</b>                  |              |

Fuente: Elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 49. **Matriz de transición diciembre 2014 a enero 2015, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b> | <b>Espejo de agua</b> | <b>Eichhornia crassipes</b> | <b>Total</b> |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|
| <b>Espejo de agua</b>       | <b>1,362</b>          | 142                         | <b>1,504</b> |
| <b>Eichhornia crassipes</b> | 731                   | <b>241</b>                  | <b>971</b>   |
| <b>Total</b>                | <b>2,093</b>          | <b>383</b>                  |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 50. **Matriz de transición abril a mayo 2015, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,916</b>                 | 177                                | <b>2,093</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 127                          | <b>256</b>                         | <b>383</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>2,043</b>                 | <b>433</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 51. **Matriz de transición junio a julio 2015, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,892</b>                 | 151                                | <b>2,043</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 144                          | <b>281</b>                         | <b>432</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>2,036</b>                 | <b>439</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 52. **Matriz de transición diciembre 2015 a enero 2016, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,682</b>                 | 354                                | <b>2,036</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 174                          | <b>266</b>                         | <b>439</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>1,856</b>                 | <b>620</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 53. **Matriz de transición marzo a abril 2016, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,560</b>                 | 296                                | <b>1,856</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 371                          | <b>248</b>                         | <b>620</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>1,931</b>                 | <b>544</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 54. **Matriz de transición mayo a junio 2016, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,559</b>                 | 372                                | <b>1,931</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 297                          | <b>248</b>                         | <b>544</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>1,856</b>                 | <b>620</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 55. **Matriz de transición junio a julio 2016, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,314</b>                 | 541                                | <b>1,856</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 274                          | <b>346</b>                         | <b>620</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>1,588</b>                 | <b>887</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 56. **Matriz de transición octubre a noviembre 2016, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,439</b>                 | 149                                | <b>1,588</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 492                          | <b>395</b>                         | <b>887</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>1,931</b>                 | <b>544</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 57. **Matriz de transición diciembre 2016 a enero 2017, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,707</b>                 | 224                                | <b>1,931</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 176                          | <b>368</b>                         | <b>544</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>1,883</b>                 | <b>592</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 58. **Matriz de transición enero a febrero 2017, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,839</b>                 | 44                                 | <b>1,883</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 302                          | <b>290</b>                         | <b>592</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>2,141</b>                 | <b>334</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 59. **Matriz de transición marzo a abril 2017, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,785</b>                 | 356                                | <b>2,141</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 47                           | <b>288</b>                         | <b>334</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>1,832</b>                 | <b>644</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 60. **Matriz de transición abril 2017 a julio 2019, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,704</b>                 | 128                                | <b>1,832</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 331                          | <b>312</b>                         | <b>644</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>2,035</b>                 | <b>440</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 61. **Matriz de transición agosto a septiembre 2019, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,791</b>                 | 244                                | <b>2,035</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 34                           | <b>406</b>                         | <b>440</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>1,825</b>                 | <b>650</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 62. **Matriz de transición septiembre a octubre 2019, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,786</b>                 | 39                                 | <b>1,825</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 223                          | <b>427</b>                         | <b>650</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>2,009</b>                 | <b>466</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 63. **Matriz de transición octubre a noviembre 2019, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,786</b>                 | 223                                | <b>2,009</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 39                           | <b>427</b>                         | <b>466</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>1,825</b>                 | <b>650</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 64. **Matriz de transición diciembre 2019 a enero 2020, laguna de Olomega**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,792</b>                 | 33                                 | <b>1,825</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 164                          | <b>486</b>                         | <b>650</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>1,956</b>                 | <b>519</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 65. **Matriz de transición marzo a abril 2020, Laguna de Olomega.**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,870</b>                 | 86                                 | <b>1,956</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 283                          | <b>236</b>                         | <b>519</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>2,153</b>                 | <b>322</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 66. Matriz de transición mayo a junio 2020, laguna de Olomega

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,870</b>                 | 283                                | <b>2,153</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 86                           | <b>236</b>                         | <b>322</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>1,956</b>                 | <b>519</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 67. Matriz de transición junio a julio 2020, laguna de Olomega

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>1,685</b>                 | 271                                | <b>1,956</b> |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 299                          | <b>220</b>                         | <b>519</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>1,984</b>                 | <b>491</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 68. Matriz de transición abril a mayo 2014, laguna El Jocotal

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>45</b>                    | 6                                  | <b>51</b>    |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 92                           | <b>199</b>                         | <b>291</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>137</b>                   | <b>205</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 69. Matriz de transición mayo a junio 2014, laguna El Jocotal

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>45</b>                    | 92                                 | <b>137</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 6                            | <b>199</b>                         | <b>205</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>51</b>                    | <b>291</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.



Apéndice 70. **Matriz de transición junio a julio 2014, laguna El Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b> | <b>Espejo de agua</b> | <b>Eichhornia crassipes</b> | <b>Total</b> |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|
| <b>Espejo de agua</b>       | <b>45</b>             | 6                           | <b>51</b>    |
| <b>Eichhornia crassipes</b> | 92                    | <b>199</b>                  | <b>291</b>   |
| <b>Total</b>                | <b>137</b>            | <b>205</b>                  |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 71. **Matriz de transición julio a agosto 2014, laguna El Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b> | <b>Espejo de agua</b> | <b>Eichhornia crassipes</b> | <b>Total</b> |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|
| <b>Espejo de agua</b>       | <b>82</b>             | 55                          | <b>137</b>   |
| <b>Eichhornia crassipes</b> | 74                    | <b>131</b>                  | <b>205</b>   |
| <b>Total</b>                | <b>156</b>            | <b>186</b>                  |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 72. **Matriz de transición diciembre 2014 a enero 2015, laguna El Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b> | <b>Espejo de agua</b> | <b>Eichhornia crassipes</b> | <b>Total</b> |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|
| <b>Espejo de agua</b>       | <b>107</b>            | 49                          | <b>156</b>   |
| <b>Eichhornia crassipes</b> | 25                    | <b>161</b>                  | <b>186</b>   |
| <b>Total</b>                | <b>132</b>            | <b>210</b>                  |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 73. **Matriz de transición abril a mayo 2015, laguna El Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b> | <b>Espejo de agua</b> | <b>Eichhornia crassipes</b> | <b>Total</b> |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|
| <b>Espejo de agua</b>       | <b>90</b>             | 42                          | <b>132</b>   |
| <b>Eichhornia crassipes</b> | 126                   | <b>84</b>                   | <b>210</b>   |
| <b>Total</b>                | <b>216</b>            | <b>126</b>                  |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 74. Matriz de transición junio a julio 2015, laguna El Jocotal

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>205</b>                   | 11                                 | <b>216</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 23                           | <b>103</b>                         | <b>126</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>228</b>                   | <b>114</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 75. Matriz de transición diciembre 2015 a enero 2016, laguna El  
Jocotal

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>141</b>                   | 87                                 | <b>228</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 11                           | <b>103</b>                         | <b>114</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>152</b>                   | <b>190</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 76. Matriz de transición marzo a abril 2016, laguna El Jocotal

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>73</b>                    | 79                                 | <b>152</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 74                           | <b>116</b>                         | <b>190</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>147</b>                   | <b>195</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 77. Matriz de transición mayo a junio 2016, laguna El Jocotal

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>73</b>                    | 74                                 | <b>147</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 79                           | <b>116</b>                         | <b>195</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>152</b>                   | <b>190</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 78. **Matriz de transición junio a julio 2016, laguna El Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>56</b>                    | 96                                 | <b>152</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 72                           | <b>118</b>                         | <b>190</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>128</b>                   | <b>214</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 79. **Matriz de transición octubre a noviembre 2016, laguna El  
Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>104</b>                   | 24                                 | <b>128</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 43                           | <b>171</b>                         | <b>214</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>147</b>                   | <b>195</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 80. **Matriz de transición diciembre 2016 a enero 2017, laguna El  
Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>136</b>                   | 11                                 | <b>147</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 13                           | <b>183</b>                         | <b>195</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>149</b>                   | <b>194</b>                         |              |

Fuente: Elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 81. **Matriz de transición enero a febrero 2017, laguna El Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>146</b>                   | 3                                  | <b>149</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 69                           | <b>124</b>                         | <b>194</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>215</b>                   | <b>127</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 82. **Matriz de transición marzo a abril 2017, laguna El Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>168</b>                   | 47                                 | <b>215</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 32                           | <b>95</b>                          | <b>127</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>200</b>                   | <b>142</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 83. **Matriz de transición abril 2017 a julio 2019, laguna El Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>132</b>                   | 68                                 | <b>200</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 44                           | <b>98</b>                          | <b>142</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>176</b>                   | <b>166</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 84. **Matriz de transición agosto a septiembre 2019, laguna El  
Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>116</b>                   | 60                                 | <b>176</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 35                           | <b>132</b>                         | <b>166</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>151</b>                   | <b>192</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 85. **Matriz de transición septiembre a octubre 2019, laguna El  
Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>127</b>                   | 24                                 | <b>151</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 81                           | <b>110</b>                         | <b>192</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>208</b>                   | <b>134</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 86. **Matriz de transición octubre a noviembre 2019, laguna El Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>126</b>                   | 82                                 | <b>208</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 25                           | <b>110</b>                         | <b>134</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>151</b>                   | <b>192</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 87. **Matriz de transición diciembre 2019 a enero 2020, laguna El Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>54</b>                    | 97                                 | <b>151</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 37                           | <b>154</b>                         | <b>192</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>91</b>                    | <b>251</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 88. **Matriz de transición marzo a abril 2020, laguna El Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>58</b>                    | 33                                 | <b>91</b>    |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 157                          | <b>94</b>                          | <b>251</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>215</b>                   | <b>127</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 89. **Matriz de transición mayo a junio 2020, laguna El Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>58</b>                    | 157                                | <b>215</b>   |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 33                           | <b>94</b>                          | <b>127</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>91</b>                    | <b>251</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.

Apéndice 90. **Matriz de transición junio a julio 2020, laguna El Jocotal**

| <b>Matriz de transición</b>        | <b><i>Espejo de agua</i></b> | <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------|
| <b><i>Espejo de agua</i></b>       | <b>72</b>                    | 19                                 | <b>91</b>    |
| <b><i>Eichhornia crassipes</i></b> | 165                          | <b>86</b>                          | <b>251</b>   |
| <b>Total</b>                       | <b>237</b>                   | <b>105</b>                         |              |

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos realizados en software ArcGIS 10.8.