

Artículo Científico / Scientific Article

Evaluación del comportamiento de la *Eichhornia crassipes* durante la sequía en las lagunas de Olomega y El Jocotal mediante sensores remotos

Evaluation of the behavior of Eichhornia crassipes during the drought in the Olomega and El Jocotal lagoons using remote sensors

Arturo Moisés Campos Hernández¹ 

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: artucampos77@gmail.com

Recibido: 26/03/2023

Revisión: 29/05/2023

Aceptado: 28/06/2023

Resumen

El afloramiento de *Eichhornia crassipes* es común en las lagunas de Olomega y El Jocotal, sin embargo, no existe una idea certera del comportamiento de la *Eichhornia crassipes* en ambas lagunas en época de sequía. En el presente estudio se analizó el fenómeno mediante el uso de sensores remotos, identificando primero los periodos de sequía a través del cálculo del índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración con los datos de precipitación mensual, temperatura máxima mensual y temperatura mínima mensual, durante los años del 2012 al 2021 en la laguna de Olomega y El Jocotal. Posteriormente, con el uso de imágenes satelitales tomadas de Landsat para los periodos de sequía seleccionados, se calcularon los índices de vegetación de diferencia normalizado para la obtención de las áreas del espejo de agua sin y con cobertura de *Eichhornia crassipes* para cada laguna. Finalmente, con los sistemas de información geográficos se realizaron diferentes matrices de transición para evaluar el comportamiento de la *Eichhornia crassipes* durante los periodos de sequía, así como del espejo de agua si afloramiento. Los resultados obtenidos mostraron que para ambas lagunas un mayor índice de sequía no es sinónimo de mayor afloramiento de *Eichhornia crassipes*, por lo que la sequía no tiene un impacto en la presencia de *Eichhornia crassipes*, sin embargo, el espejo de agua sin afloramiento si se ve afectado en los periodos de sequía.

Palabras claves: índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración, índice de vegetación de diferencia normalizado, humedal, plantas acuáticas invasoras, matriz de transición, imagen satelital.

Abstract

The algal bloom of *Eichhornia crassipes* is common in the lagoons of Olomega and El Jocotal, however, there is no accurate idea of the behavior of *Eichhornia crassipes* in both lagoons during the dry season. In the present study, the phenomenon was analyzed using remote sensors, first identifying the drought periods through the calculation of the standardized precipitation and evapotranspiration index with the data of monthly precipitation, monthly maximum temperature, and monthly minimum temperature, during the years from 2012 to 2021 in the Olomega and El Jocotal lagoons. Subsequently, with the use of satellite images taken from Landsat for the selected drought periods, the normalized difference vegetation indices were calculated to obtain the areas of the water mirror without and with algal bloom of *Eichhornia crassipes* for each lagoon. Finally, with geographical information systems, different transition matrices were created to evaluate the changes of algal bloom of *Eichhornia crassipes* during periods of drought, as well as of the area of water body without algal bloom. The results obtained showed that for both lagoons a higher drought index is not synonymous with a greater algal bloom of *Eichhornia crassipes*, so drought does not have an impact on the presence of *Eichhornia crassipes*, however, the water body without algal bloom does is affected during periods of drought.

Key words: standardized precipitation-evapotranspiration index, normalized difference vegetation index, wetland, invasive aquatic plants, transition matrix, satellite image.



© 2023 Arturo M., Campos Hernández.

Agua, Saneamiento & Ambiente, es editada por la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Esta obra está protegida bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartir

Igual 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Introducción

Las lagunas de Olomega y El Jocotal están siendo afectadas por la *Eichhornia crassipes*, ya que las afloraciones de esta ocasionan graves problemas ambientales, además de dificultar o imposibilitar la actividad humana en los humedales y las zonas aledañas. La cantidad de biomasa que producen estas plantas reduce la cantidad de luz y al descomponerse disminuyen los niveles de oxígeno disuelto, lo cual es fatal para la fauna acuática.

En la última década el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) del Salvador 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 [MARN], 2019).

El presente estudio se realizó con el objetivo de analizar el comportamiento de la *Eichhornia crassipes* durante el período de sequía en la laguna de Olomega y El Jocotal mediante sensores remotos, y que esto sirva para proponer acciones en los planes de gestión integral del manejo de ambas lagunas para su recuperación y preservación.

La laguna de Olomega es el cuarto cuerpo natural de agua dulce más grande de El Salvador. La extensión en época seca de dicha laguna es de 2,422 ha, mientras que en época lluviosa es de 2,597 ha, además fue declarado humedal nacional. La laguna El Jocotal es una de las primeras áreas naturales identificadas en El Salvador a principios de la década de 1970. La extensión en época seca de la laguna El Jocotal es de 296 ha, mientras que en época lluviosa es de 723 ha (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2018).

Estudios recientes han demostrado la importancia que tiene la utilización de sensores remotos para entender el impacto de la *Eichhornia crassipes* en la calidad del agua combinando el método del umbral adaptativo de pendiente de histograma optimizado (OHSAT) basado en datos del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) y el método de segmentación de umbral empírico basado en datos del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), obteniéndose como resultado que el tamaño y

crecimiento de la *Eichhornia crassipes* son inversamente proporcionales al NDVI del cuerpo de agua (Shen et al. 2023).

El uso del NDVI es un método bien conocido que puede usarse para monitorear plantas acuáticas, tal como lo indican Robles y colaboradores (2015), quienes desarrollaron estudios en los lagos Columbus Aberdeen (Mississippi) durante el período 2005 y 2006 sobre poblaciones establecidas de jacintos de agua para determinar la biomasa basándose en métodos no destructivos utilizando el NDVI derivados de datos simulados Landsat 5 TM.

Dube y colaboradores (2017), evaluaron el rendimiento del sensor Landsat 8 OLI/TIRS para el análisis de especies invasoras en lagos continentales a través de la identificación de ventanas espectrales entre la *Eichhornia crassipes* y otros tipos de cubierta del suelo en el lago Chivero en Zimbabwe, encontrando que los sensores multiespectrales de nueva generación tienen una relevancia para proporcionar datos primarios para mapear la distribución espacial e incluso la configuración de malezas acuáticas a un costo muy bajo en el tiempo y el espacio.

Este tipo de técnicas se han utilizado para analizar las afloraciones de algas nocivas (HABs) a través de un enfoque basado en sensores remotos de múltiples fuentes para el monitoreo de estas HABs en el lago Chaohu en China, integrando Terra/Aqua MODIS, Landsat 8 OLI y Sentinel-2A/B MSI para lograr observaciones de alta resolución temporal y espacial, concluyendo que la teledetección satelital ofrece un gran potencial para contribuir significativamente a la necesidad de monitorear las HABs a gran escala; sin embargo, es preferible un enfoque basado en sensores remotos de múltiples fuentes para lograr observaciones de HABs de alta resolución temporal y espacial, como la integración de Terra/Aqua MODIS, Landsat 8 OLI y Sentinel-2A/B MSI (Ma et al., 2021).

Este tipo de técnicas se hacen cada vez más necesarias dado que analizando las imágenes Landsat de 37 años (1982-2018), se detectaron 863 lagos impactados por proliferación de algas, lo que evidencia el deterioro de este tipo de cuerpos de agua (Fang et al., 2022).

Materiales y método

Enfoque metodológico

El estudio realizado fue de tipo cuantitativo, para lo cual se recolectaron datos para probar la hipótesis con base a su análisis e interpretación. El estudio se realizó implementando una serie de pasos que se detallan a continuación en el orden que fueron realizados.

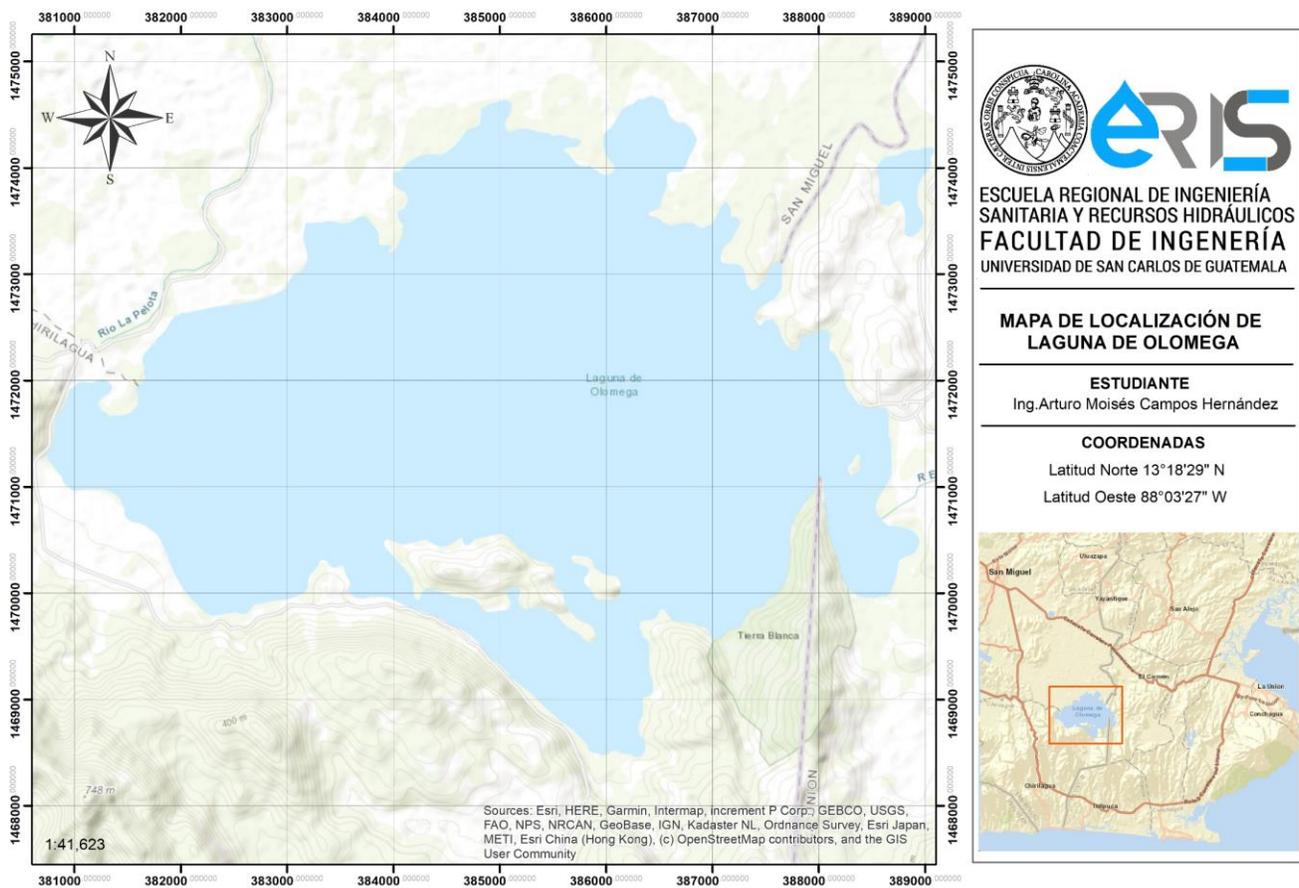
Definición de variables

Para el estudio se descargaron los datos meteorológicos en formato CSV desde el portal de la NASA POWER DAV. Para ambas lagunas se utilizaron los mismos datos meteorológicos, debido a que este portal mostró los mismos registros de precipitación mensual, temperaturas mensuales máximas y mínimas para ambas lagunas, dado que estas se encuentran cerca una de la otra.

Para la obtención de los datos fue fundamental la ubicación de las lagunas Olomega y El Jocotal, las cuales fueron obtenidas mediante la ficha informativa Ramsar y el GEOPORTAL CNR del Centro Nacional de Registros de El Salvador. Además, los datos meteorológicos fueron comparados y validados con los datos registrados en el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), específicamente de la estación San Miguel-UES.

La laguna de Olomega tiene una extensión de 2,475 ha y se encuentra en la región administrativa oriental de El Salvador dentro de los municipios de San Miguel y Chirilagua del departamento de San Miguel, así como en el municipio El Carmen del departamento de La Unión. La Laguna Olomega se ubica en la latitud norte 13°18'29" N y longitud oeste 88°03'27" W (Ver figura 1).

Figura 1: Mapa de localización de laguna de Olomega.



La laguna El Jocotal tiene una extensión de 342 ha, y se encuentra en la región administrativa oriental de El Salvador, dentro del municipio de El Transito en el departamento de San Miguel colindando en el sector norte con 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 lagunas Agua Caliente, Los Piches y San Juan, además de colindar con las orillas de la sierra de Jucuarán. En el este colinda con las zonas de inundación utilizadas en época lluviosa para riego. La laguna se ubica en las coordenadas: latitud norte 13°21'14" N, y longitud oeste 88°12'47" W (Ver figura 2).

Ambas lagunas son afectadas directamente por la *Eichhornia crassipes*, conocida comúnmente como Jacinto de agua, la cual es vegetación de tipo flotante.

Los diferentes datos de precipitaciones mensuales en ambas lagunas a lo largo del periodo de enero 2012 a diciembre 2021 fueron muy variados como se muestra en figura 3, los datos fueron recopilados en milímetros de lluvia, siendo el pico de ellos 359 mm en el mes de agosto del 2012. El promedio de lluvia durante todo el periodo evaluado fue de 106.07 mm.

Los datos de temperatura máximas y mínimas en ambas lagunas se muestran en la figura 4, la máxima temperatura registrada durante todo el periodo evaluado fue de 40 °C en el mes de abril del 2020, mientras que la mínima temperatura registrada fue de 17 °C en el mes de febrero del 2021.

Figura 2: Mapa de localización de laguna de El Jocotal

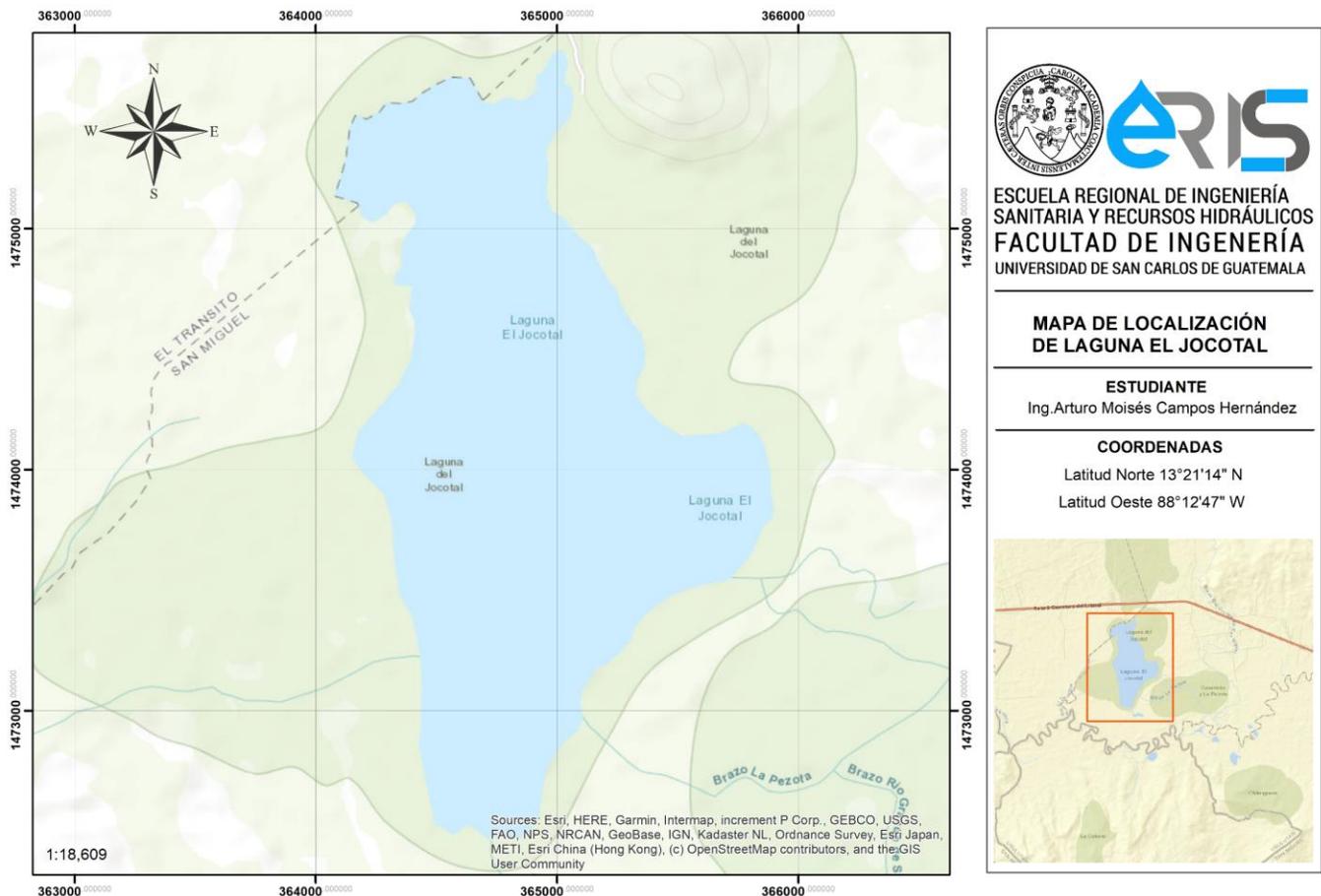


Figura 3: Precipitación mensual en el área de las lagunas de Olomega y El Jocotal en el período del 2012 al 2021.

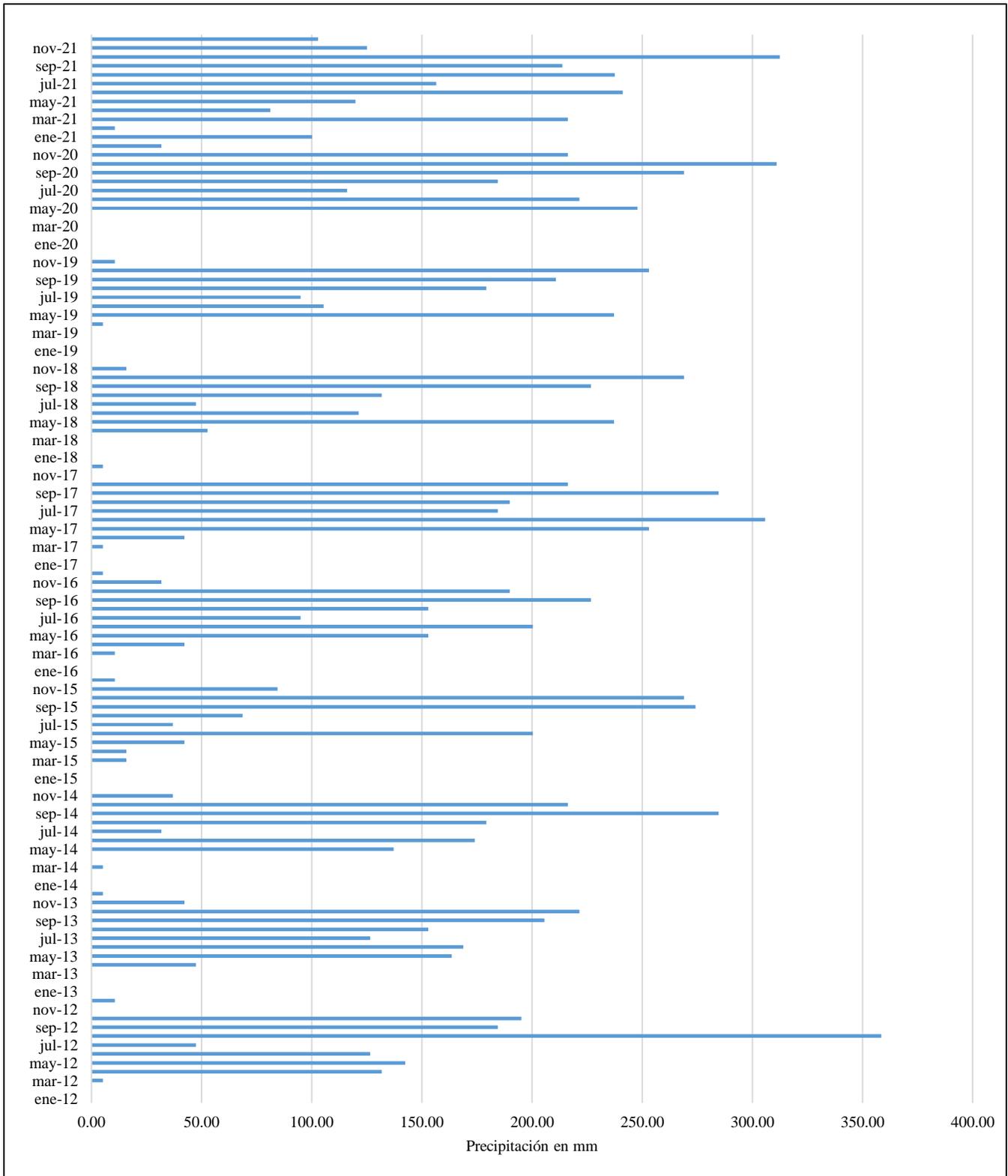
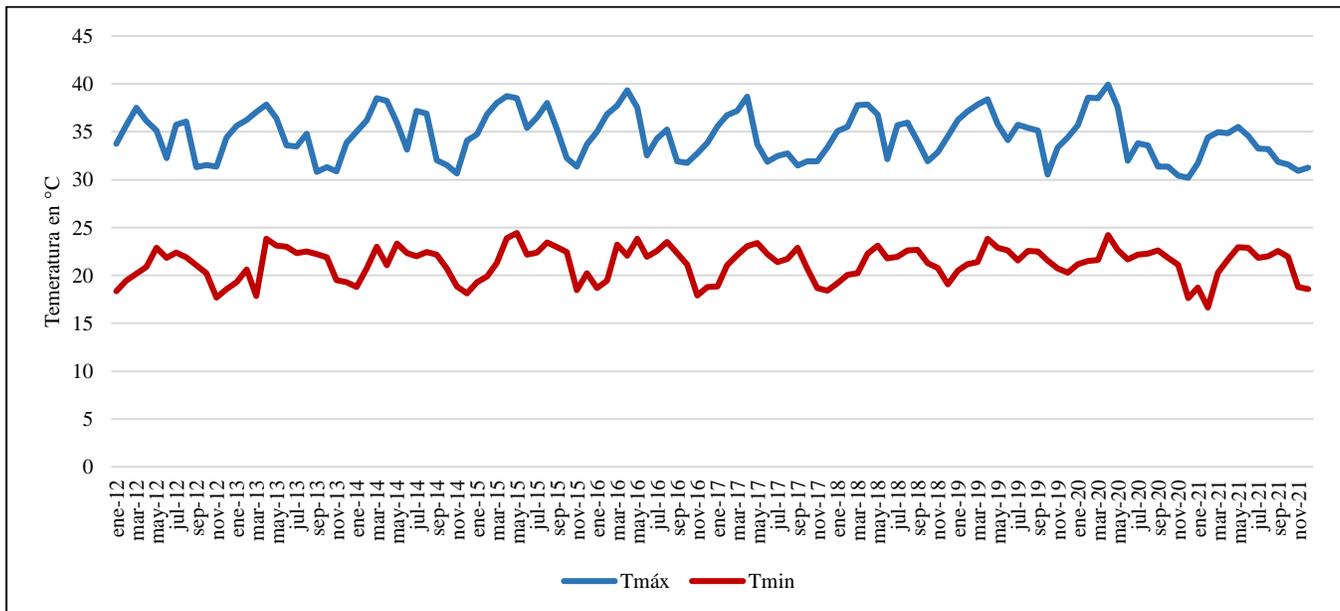


Figura 4: Temperaturas máximas y mínimas mensuales en el área de las laguna de Olomega y El Jocotal, durante el período del 2012 al 2021.



Evapotranspiración potencial

Los períodos de sequía se obtuvieron realizando el cálculo de evapotranspiración potencial de cada mes utilizando la ecuación de Hargreaves (ver ecuación 1) en el software RStudio con el paquete SPEI de enero del 2023.

$$E_{rc} = 0.0022 * R_A * \delta T^{0.5} * (T + 17.8) \quad (1)$$

Donde:

E_{rc} = Evapotranspiración potencial (mm)

R_A = Radiación solar extraterrestre.

δT = Diferencia de temperatura. (°C)

T = Temperatura promedio del aire. (°C)

Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración

Los resultados del cálculo de evapotranspiración potencial se emplearon para la obtención del índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración, con la relación de la precipitación mensual acumulada para los años de estudio. Posteriormente al obtener el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración de cada mes se pudo determinar

cuáles eran los meses de sequía, seleccionando los meses que obtuvieron un índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración negativo en el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizado. Los valores positivos fueron descartados al no considerar esta investigación el comportamiento de la *Eichhornia crassipes* en periodos sin sequía.

Instrumentos de obtención de información para determinar el índice de vegetación de diferencia normalizado

La cobertura de *Eichhornia crassipes* es la única especie dentro de la extensión de las lagunas evaluadas (MARN 2018, y MARN 2019). 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* en el espejo de agua se utilizó la información del portal del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) siendo este 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 para los años del período 2012 al 2021. En este análisis 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.

En total se descargaron 14 elementos para cada mes analizado, 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 ecuación 2 mostrada a continuación:

$$NDVI = \frac{\text{Banda 5} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 5} + \text{Banda 4}} \quad (2)$$

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)

Matriz de transición de cobertura de *Eichhornia crassipes* y espejo de agua sin cobertura

El uso de los sistemas de información geográfica fue importante en el estudio para realizar el contraste de las bandas con el uso de los shapes proporcionados por el GEOPORTAL CNR del Centro Nacional de Registros de El Salvador, posteriormente a ello fue de utilidad la ayuda de la tabla de atributos y la calculadora de campo del software ArcGIS 10.8 para determinar el área cubierta por *Eichhornia crassipes* y por el espejo de agua no cubierto, siendo los valores menores de 0 el espejo de agua no cubierto, y los valores mayores de 0 al espejo de agua con cobertura de *Eichhornia crassipes*.

Para definir la cobertura de cambio de *Eichhornia crassipes* y espejo de agua sin cobertura, se elaboró una matriz de transición entre los periodos identificados con sequía, para ello se aplicó la herramienta Intersect

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.

Luego se cuantificaron las áreas en hectáreas del nuevo shape para obtener los valores entre fechas que se mantuvieron o donde no existió algún cambio, y los valores donde si se generó un cambio en el espejo de agua sin cobertura y espejo de agua con cobertura de *Eichhornia crassipes*.

El índice de vegetación normalizado fue con el fin de comprobar si la sequía contribuye en el mayor afloramiento de la *Eichhornia crassipes* y a la vez el impacto que genera en el espejo de agua de ambas lagunas.

Resultados

Evapotranspiración potencial

Como se muestra en figura 5 el mes con mayor valor de evapotranspiración potencial fue abril en el año 2016 con 216 mm según cálculos realizados con el software RStudio, el mes con menor valor fue noviembre del año 2020 con 115 mm, además, el valor promedio entre los periodos evaluados fue de 167 mm.

Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración

Como se muestra en figura 6 a través del índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI), los periodos de sequía en la laguna de Olomega y El Jocotal sucedieron en los meses de abril a diciembre del año 2014, siendo este el año con periodos de sequía con SPEI menos extremos.

En los años 2015 y 2016 la sequía se mantuvo a lo largo de todo el año, siendo el año 2015 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 la sequía se presentó en los meses de enero a julio.

Figura 5: Evapotranspiración potencial en la laguna de Olomega y El Jocotal en el período del 2012 al 2021

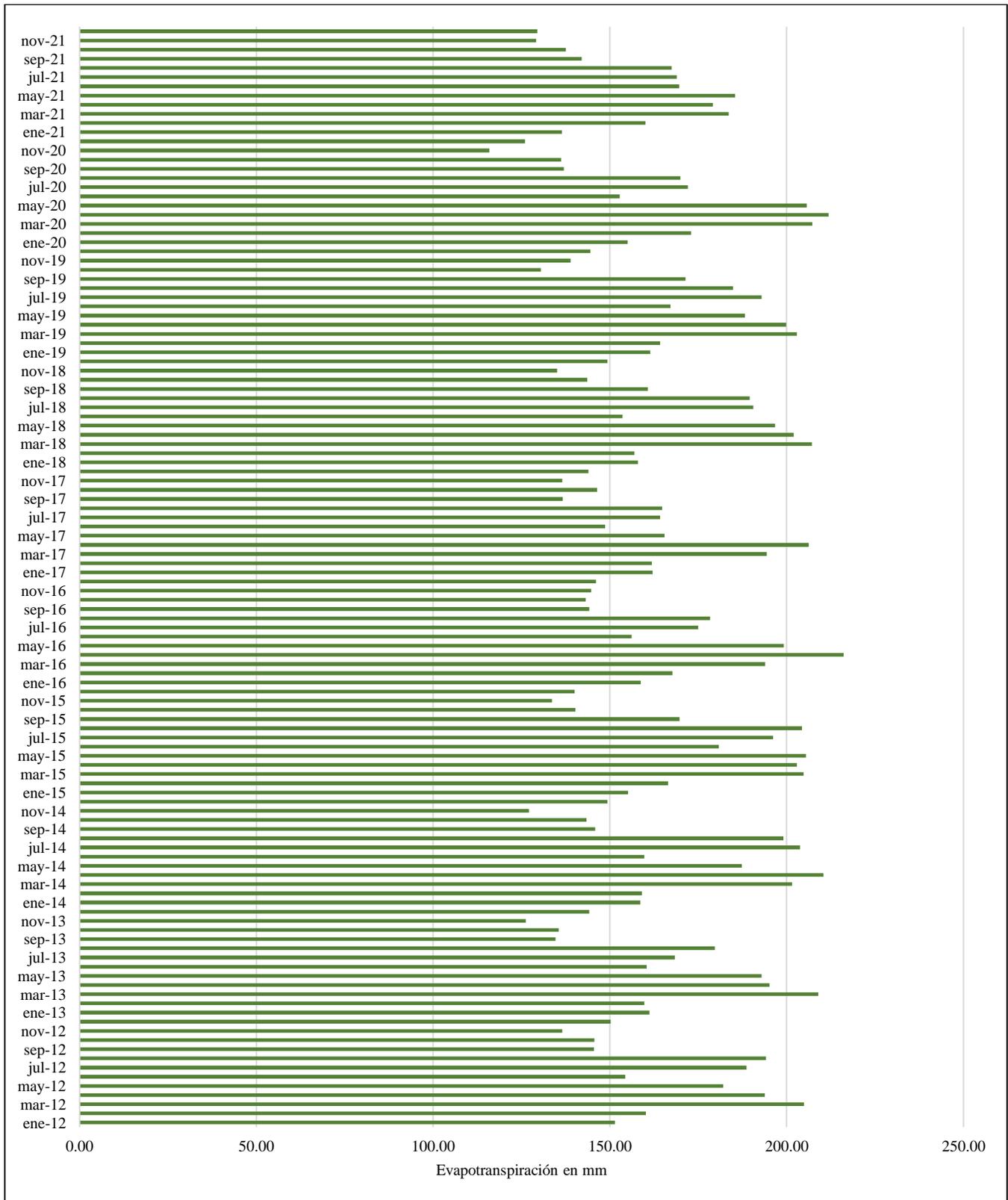
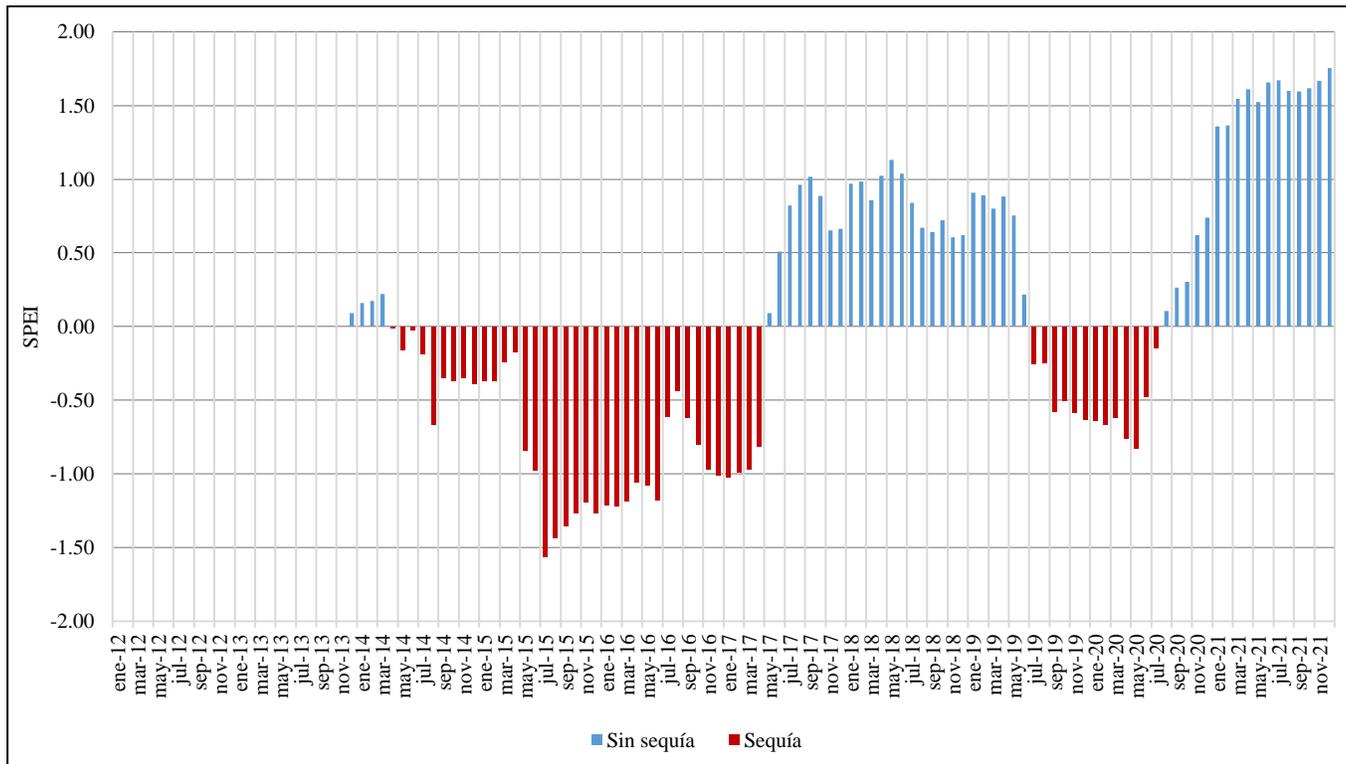


Figura 6: Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI) en laguna de Olomega y El Jocotal, período 2012-2021



Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) y matriz de transición de cobertura de *Eichhornia crassipes* en la laguna de Olomega

Para la laguna de Olomega se pudo identificar que, en abril del año 2014, el índice NDVI varió entre los rangos 0.5 y -0.1, teniendo una cobertura de 26.4 % del espejo de agua de la laguna con *Eichhornia crassipes* (ver figura 7).

En el mes de julio del año 2020 el NDVI se mantuvo entre los rangos 0.6 y -0.1, con cobertura del 19.8 % del espejo de agua de la laguna con *Eichhornia crassipes*, lo que implica una disminución del 6.6 % de cobertura de *Eichhornia crassipes* en abril de 2014 con respecto a julio del 2020 (ver figura 8).

El área de la laguna de Olomega que permaneció sin cambio en el mes de abril del 2014 con relación al mes de julio de 2020 fue de 311 ha de *Eichhornia crassipes*, y 1,642 ha de espejo de agua sin *Eichhornia crassipes* (ver tabla 1).

En el mes de abril del 2014, la superficie sin *Eichhornia crassipes* fue de 1,822 ha y con *Eichhornia crassipes* de 653 ha, mientras que en julio del 2020 la superficie sin *Eichhornia crassipes* fue de 1,984 ha y con *Eichhornia crassipes* de 491 ha (ver tabla 1).

Tabla 1: Matriz de transición abril 2014 y julio 2020 para la laguna de Olomega

Matriz de transición	Superficie sin <i>Eichhornia crassipes</i> 2014	Superficie con <i>Eichhornia crassipes</i> 2014	Total 2014
Superficie sin <i>Eichhornia crassipes</i> 2020	1,642 ha	180 ha	1,822 ha
Superficie con <i>Eichhornia crassipes</i> 2020	342 ha	311 ha	653 ha
Totales 2020	1,984 ha	491 ha	

La figura 9 muestra la transición de cambio de cobertura de la *Eichhornia crassipes* durante todos los periodos de sequía.

Figura 7: Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) en laguna de Olomega, abril 2014

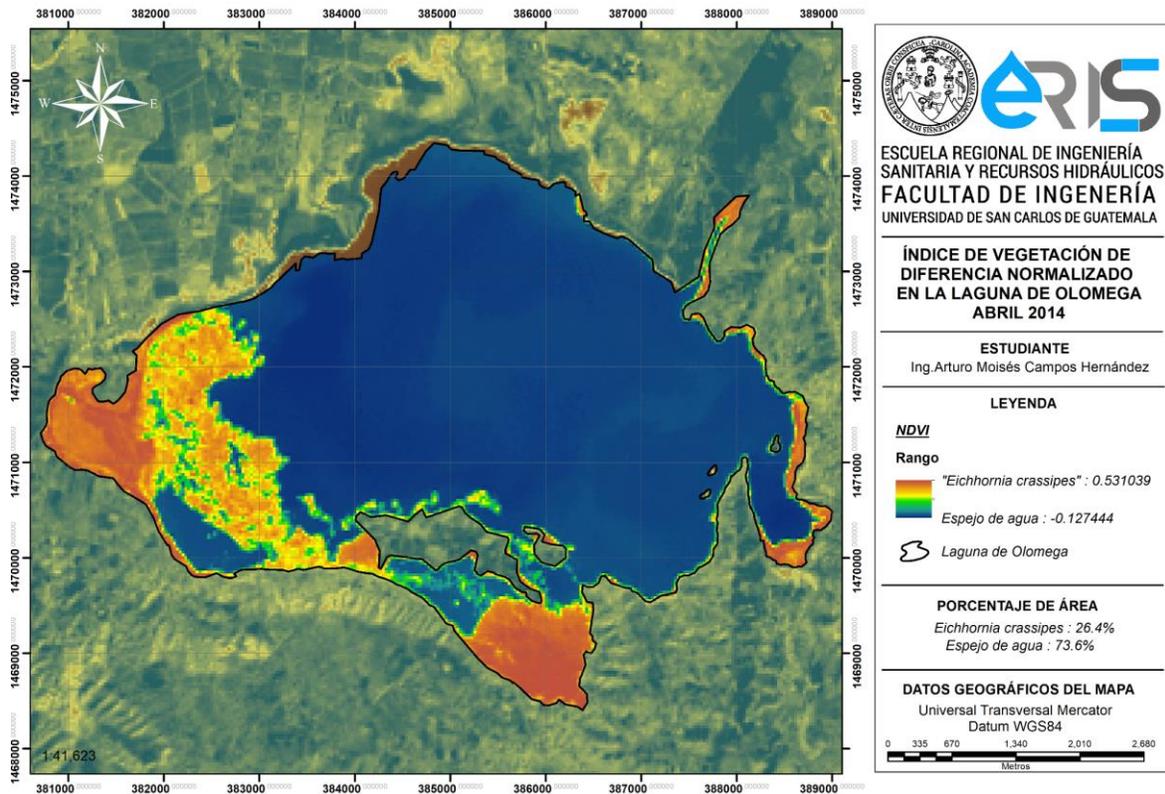


Figura 8: Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) en laguna de Olomega, julio 2020

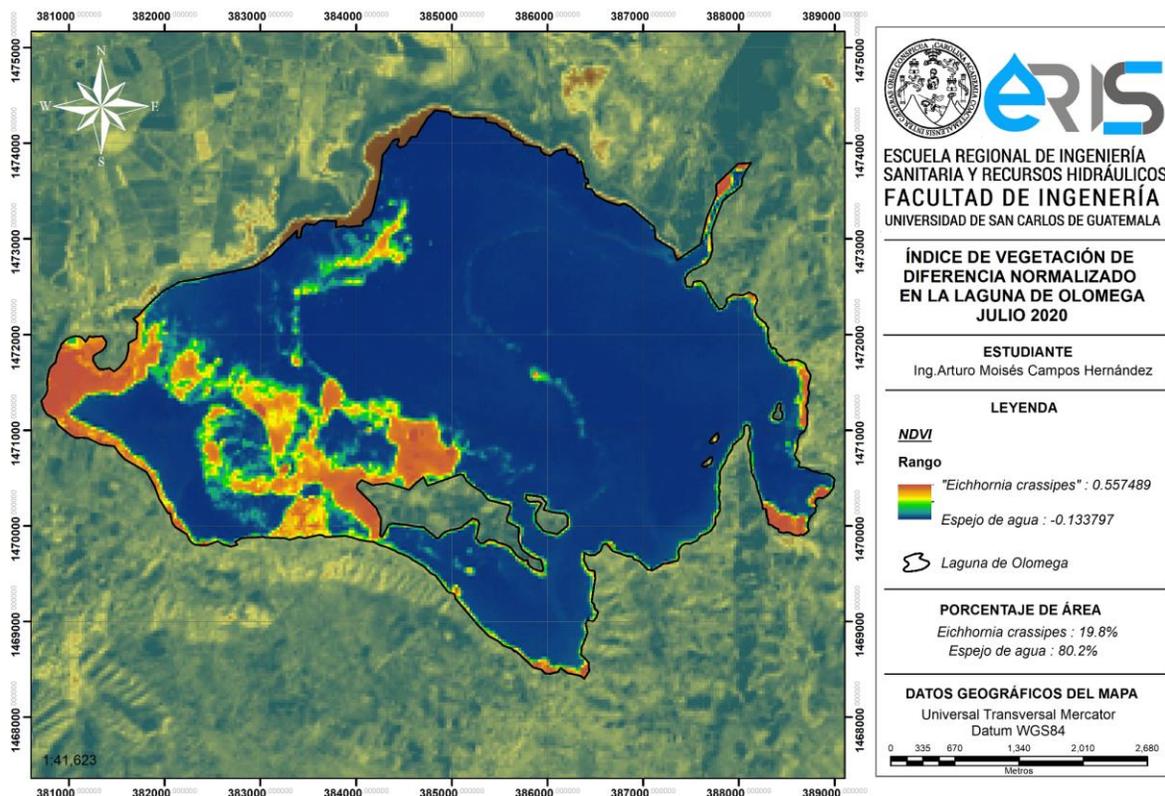
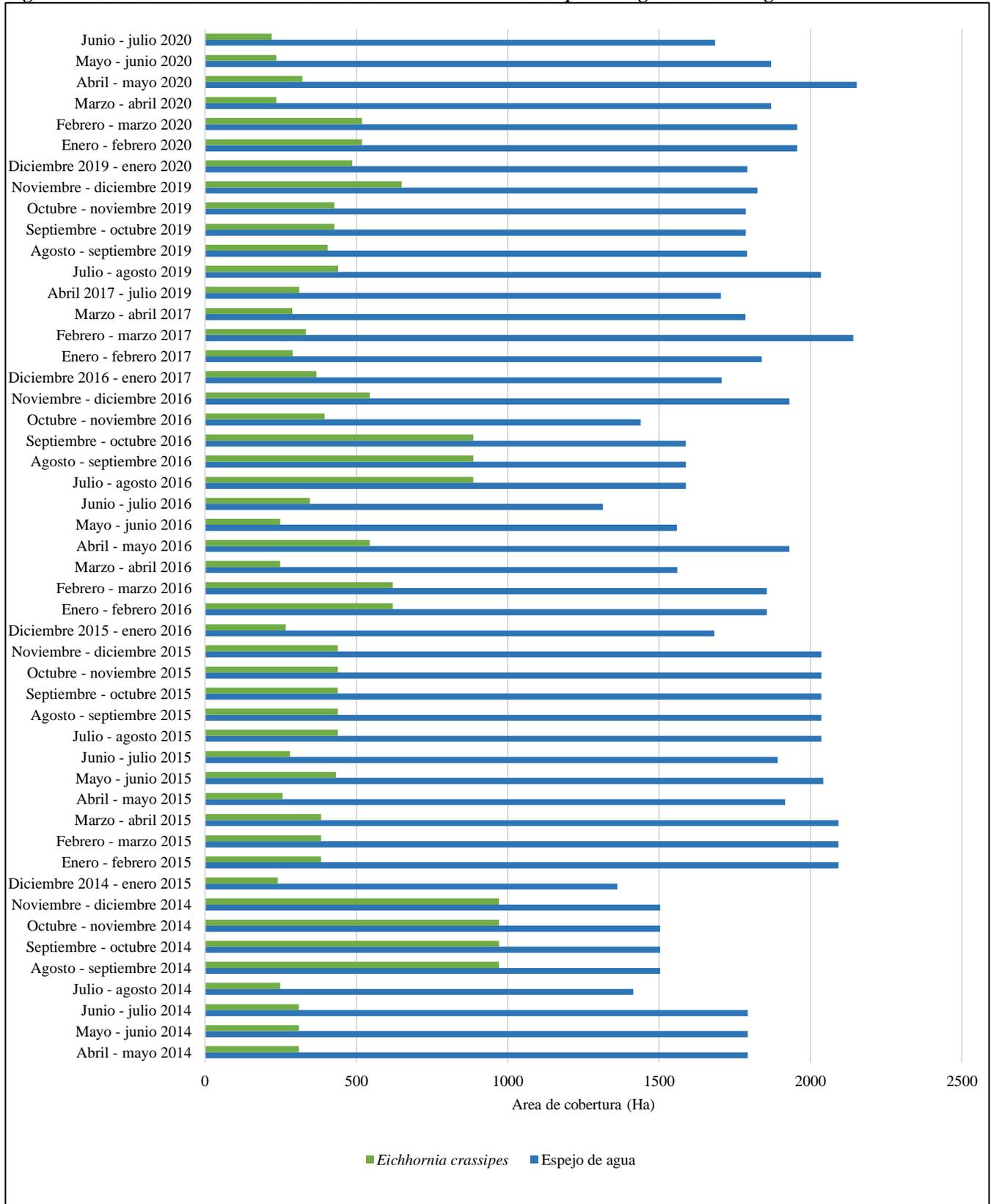


Figura 9: Gráfica de transición de cobertura de la *Eichhornia crassipes* en laguna de Olomega



Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) y matriz de transición de cobertura de *Eichhornia crassipes* para la laguna El Jocotal

El índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) para la laguna El Jocotal en abril 2014 estuvo entre los rangos 0.6 y -0.1, mostrando una cobertura del espejo de agua del 85.0% de *Eichhornia crassipes* (ver figura 10).

En la figura 11 se muestra la transición de cambio de cobertura de espejo de agua y la cobertura con *Eichhornia crassipes* durante los periodos de sequía.

En el mes de julio 2020 el NDVI se encontró entre los rangos 0.5 y -0.1, con 30.6% de cobertura del espejo de agua con *Eichhornia crassipes*, significando esto una disminución del 54.4% de cobertura de *Eichhornia crassipes* entre el mes de abril 2014 y julio 2022 (ver figura 12).

En abril de 2014, el área de la laguna no cubierta con *Eichhornia crassipes* fue de 51 ha, mientras que el área cubierta con *Eichhornia crassipes* fue de 291 ha.

En julio 2020 el área de la laguna no cubierta con *Eichhornia crassipes* fue de 237 ha, mientras que la que mostró cobertura de *Eichhornia crassipes* fue de 105 ha (ver tabla 2).

Tabla 2: Matriz de transición abril 2014 y julio 2020 para la laguna El Jocotal

Matriz de transición	Superficie sin <i>Eichhornia crassipes</i> 2014	Superficie con <i>Eichhornia crassipes</i> 2014	Total 2014
Superficie sin <i>Eichhornia crassipes</i> 2020	37 ha	14 ha	51 ha
Superficie con <i>Eichhornia crassipes</i> 2020	200 ha	91 ha	291 ha
Totales 2020	237 ha	105 ha	

Figura 10: Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) en laguna El Jocotal, abril 2014

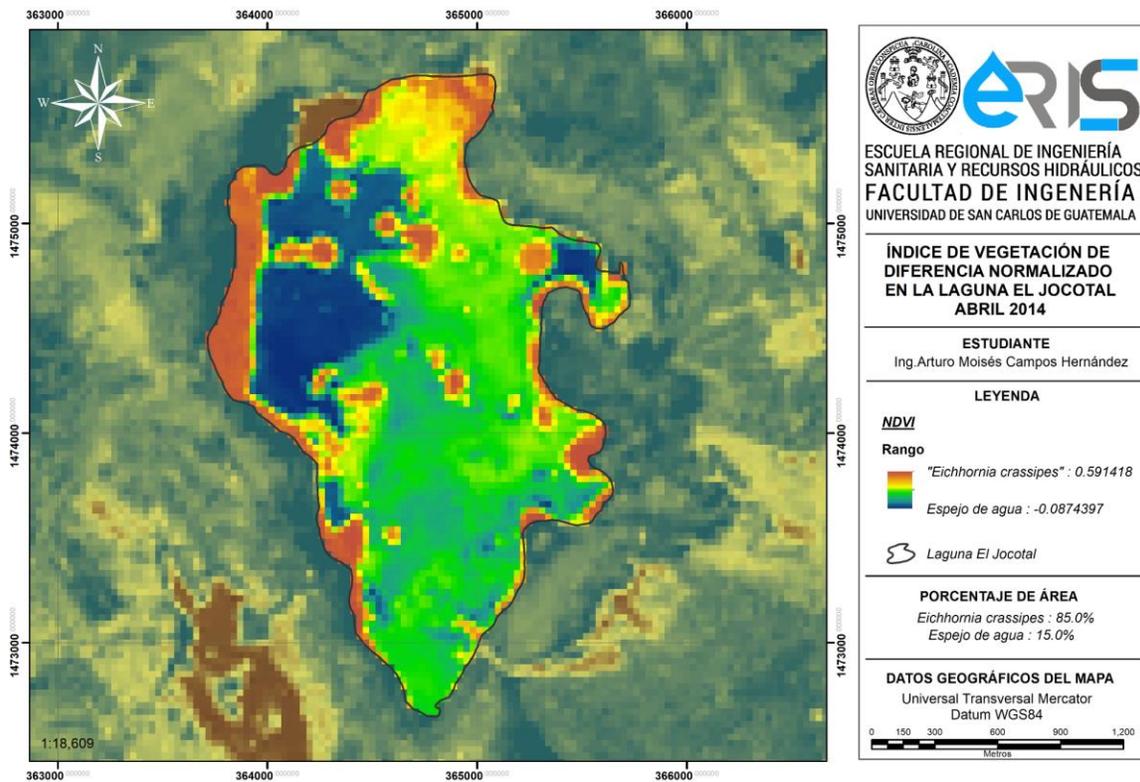


Figura 11: Gráfica de transición cobertura de la *Eichhornia crassipes* en laguna El Jocotal

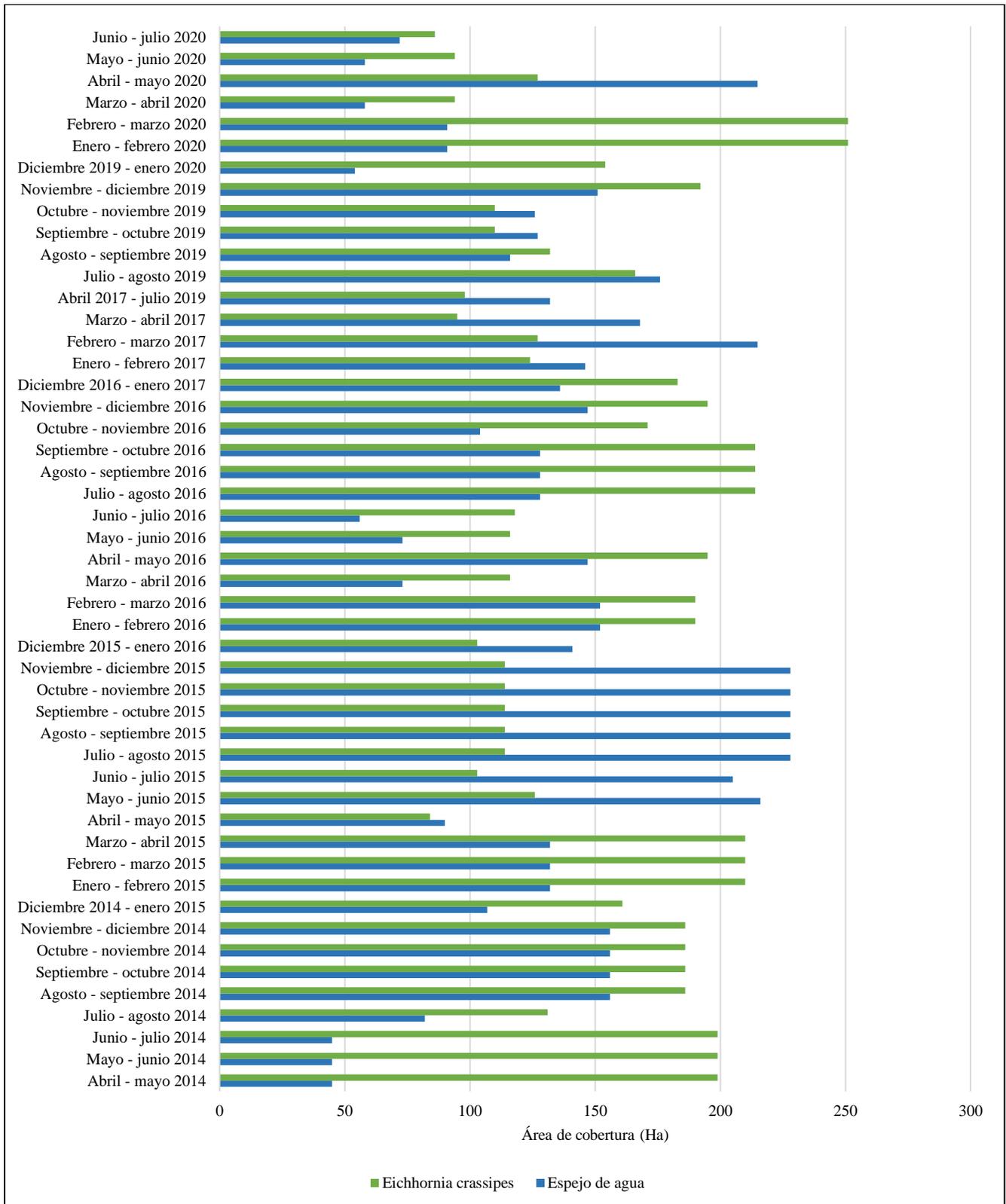
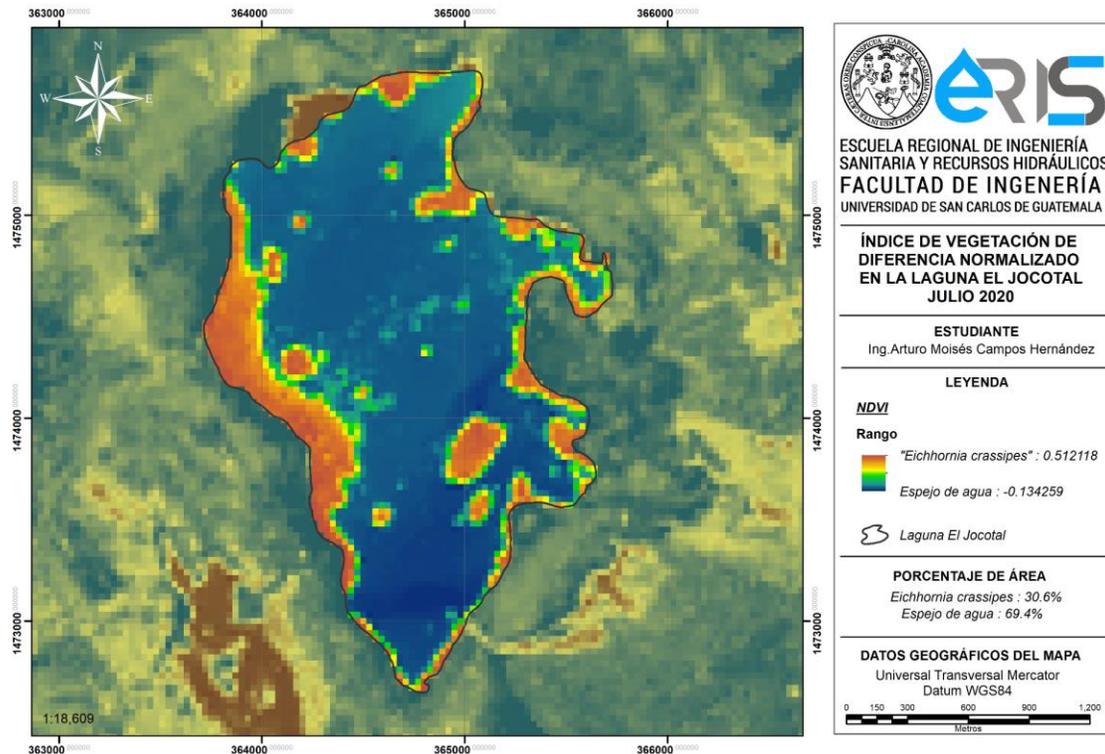


Figura 12: Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) en laguna El Jocotal, julio 2020



Discusión de resultados

El uso del NDVI como método de análisis fue indispensable para el estudio, ya que de esta manera se estimó el comportamiento de la *Eichhornia crassipes* mediante un método no destructivo, por lo que al igual que el estudio realizado por Robles y colaboradores (2015) se logra preservar el ecosistema, sin embargo, en la investigación mencionada anteriormente los resultados indicaban que por el tamaño del cuerpo de agua la vegetación era muy densa, lo cual limitaba su uso para estimar la biomasa, a diferencia de la investigación presente la cual si arroja valores acordes a las campañas de extracción de la planta que se realizan en ambas lagunas.

La teleobservación de los recursos de agua dulce está adquiriendo cada vez más importancia, debido al aumento de las plantas acuáticas invasivas y a los efectos actuales o previstos del cambio climático y a la rápida invasión de algas letales. Dube y colaboradores (2017) realizaron un estudio sobre el nivel de precisión de Landsat 8 OLI y Landsat 7 ETM, arrojando mejores valores de precisión el Landsat 8 OLI con una precisión

de clasificación general del 72%, a diferencia del Landsat 7 ETM que mostró una precisión inferior al 57%, además, Landsat 8 OLI evidenció una precisión óptima del 92% para la planta acuática invasiva *Eichhornia crassipes*, mientras que Landsat 7 ETM dio un valor del 67%.

Comparando los valores de extracción de la planta en la laguna de Olomega y El Jocotal con los valores de porcentaje de la planta en ambas lagunas a través del NDVI, se puede confirmar que al ser cercanos los resultados obtenidos utilizando Landsat 8 OLI, estos tienen una precisión óptima y permite tener un panorama real del estado de ambas lagunas ante la presencia de *Eichhornia crassipes*.

Según Shen y colaboradores (2023) la *Eichhornia crassipes* promueve la mejora en la calidad del agua, sin embargo, también es propensa a promover el enriquecimiento de las algas, dando lugar a zonas de floración de algas moderadas o severas en áreas circundantes de *Eichhornia crassipes*, poniendo esto de manifiesto el impacto positivo que tiene esta en el espejo de agua en términos de calidad de agua.

En este estudio se analizó el impacto que la sequía puede tener en el espejo de agua y su relación con la presencia de *Eichhornia crassipes*, encontrando que en la laguna de Olomega, la mayor área del espejo de agua (sin cobertura de *Eichhornia crassipes*) se presentó en el período de transición abril – mayo 2020, con un área de 2,153 ha, mientras que la mayor área del espejo de agua que tuvo *Eichhornia crassipes* se presentó en el período de transición de agosto a diciembre del 2014 con un área de 971 ha (ver figura 9).

En la laguna de Olomega se pudo observar también que la menor área de espejo de agua sin cobertura de *Eichhornia crassipes* se presentó en el período de transición de junio – julio del 2016 con un área de 1,314 ha, mientras que el área del espejo de agua con menor cobertura de *Eichhornia crassipes* se presentó en el período de junio – julio de 2020 con un área de 220 ha (ver figura 9).

El índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración para la laguna Olomega tiene un valor de -0.14 en julio 2020 lo cual indica una sequía muy severa, y una cobertura de 491 ha de *Eichhornia crassipes*, siendo esta cobertura de *Eichhornia crassipes* menor a la presentada en el mes de abril 2014 con 653 ha y un valor de SPEI -0.01. Por lo anterior mayor índice de sequía no es sinónimo de mayor afloramiento de *Eichhornia crassipes* para la laguna de Olomega.

En la laguna El Jocotal la mayor área del espejo de agua sin cobertura de *Eichhornia crassipes* se presentó en el período de transición de julio – diciembre 2015 con un área de 228 ha, mientras que la mayor cobertura de *Eichhornia crassipes* se presentó en el período de transición de enero – marzo 2020 con un área de 251 ha.

La menor cobertura de espejo de agua sin *Eichhornia crassipes* en la laguna El Jocotal se presentó en el período de transición de abril – julio 2014 con un área de 45 ha, mientras que la menor cobertura de *Eichhornia crassipes* se presentó en el período de transición de abril – mayo 2015 con un área de 84 ha (ver figura 11).

El índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración en la laguna El Jocotal tiene un valor de -0.14 en julio 2020, y una cobertura de 105 ha

de *Eichhornia crassipes*, siendo menor a la cobertura de *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* en la laguna El Jocotal.

Conclusiones

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* durante época de sequía.

Los periodos de sequía seleccionados 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.

El área promedio en la laguna de Olomega que no presentó cobertura de *Eichhornia crassipes* durante el período del este estudio fue de 1,791 ha, mientras que el área cubierta por *Eichhornia crassipes* fue de 461 ha, haciendo un área total de la laguna de 2,475 ha aproximadamente, mostrando que esta área total permanece sin cambio en un 91%.

Para la laguna El Jocotal, el área promedio que no presentó cobertura de *Eichhornia crassipes* fue de 134 ha, mientras que el área cubierta con *Eichhornia crassipes* fue de 251 ha, totalizando un área de la laguna de 342 ha, de los cuales aproximadamente el 84% permanece sin cambio.

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.

Es importante tomar en cuenta que 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, etc., por lo que es recomendable dar seguimiento a este

estudio incorporando este tipo de variables que permitan una mejor gestión de las lagunas de Olomega y El Jocotal de El Salvador.

Agradecimientos

Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), por el financiamiento para la realización del estudio.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado con recursos del autor y del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD).

Conflicto de interés

El autor declara no tener ningún tipo de conflicto de interés que pudiera haber influido en esta investigación.

Como citar este documento

Campos Hernández, A.M. (2023). Evaluación del comportamiento de la *Eichhornia crassipes* durante la sequía en las lagunas de Olomega y El Jocotal mediante sensores remotos. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 18(1), Artículo e 1583.
<https://doi.org/10.36829/08ASA.v18i1.1583>

Consentimiento informado

No aplica.

Contribuciones de autor

Conceptualización, trabajo de campo, tabulación, análisis y escritura: A.M.C.H.

Declaración de disponibilidad de datos del estudio.

- 1) Imágenes Landsat fueron descargadas de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- 2) Datos climáticos fueron descargados de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Referencias

- Dube, T., Mutanga, O., Sibanda, M., Bangamwabo, V., & Shoko, C. (2017). Evaluating the performance of the newly-launched Landsat 8 sensor in detecting and mapping the spatial configuration of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in inland lakes, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 100(1), 101-111.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.02.015>
- Fang, C., Song, K., Paerl, H. W., Jacinthe, P.A, Wen, Z., Liu, G., Tao, H., Xu, X., Kutser, T., Wang, Z., Duan, H., Shi, K., Shang, Y., Lyu, L., Li, S., Yang, Q., Lyu, D., Mao, D., Zhang, B., Cheng, S., Lyu, Y. (2022). Global divergent trends of algal blooms detected by satellite during 1982-2018. *Global Change Biology*, 28(7), 2327-2340. <https://doi.org/10.1111/gcb.16077>
- Ma, J., Jin, S., Li, J., He, Y., & Shang, W. (2021). Spatio-temporal variations and driving forces of harmful algal blooms in Chaohu Lake: a multi-source remote sensing approach. *Remote Sensing*, 13(1), Article e427.
<https://doi.org/10.3390/rs13030427>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN]. (2018). *Catálogo de mapas de zonas críticas prioritarias en humedales Ramsar de El Salvador: herramienta para la estrategia de restauración de humedales*. Recuperado el 4 de marzo de 2023, de <https://cidoc.ambiente.gob.sv/documentos/catalogo-de-mapas-de-zonas-criticas-prioritarias-en-humedales-ramsar-de-el-salvador-herramienta-para-la-estrategia-de-restauracion-de-humedales/>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN]. (2018). *Inventario Nacional de Humedales El Salvador*. Recuperado el 4 de marzo de 2023, de <https://cidoc.ambiente.gob.sv/documentos/inventario-nacional-de-humedales-el-salvador/>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN]. (2019). *Protocolo para el control de jacinto de agua y otras plantas acuáticas invasoras en El Salvador*. Recuperado el 2 de marzo de 2023, de <https://cidoc.ambiente.gob.sv/documentos/protocolo-para-el-control-de-jacinto-de-agua-y-otras-plantas-acuaticas-invasoras/>
- Robles, W., Madsen, J. D., & Wersal, R. M. (2015). Estimating the biomass of Waterhyacinth (*Eichhornia crassipes*) using the normalized difference vegetation index derived from simulated Landsat 5 TM. *Invasive Plant Science and Management*, 8(2), 203-211.
<https://doi.org/10.1614/IPSM-D-14-00033.1>
- Shen, J., He, P., Sun, X., Shen, Z., & Xu, R. (2023). Impact *Eichhornia crassipes* cultivation on water quality in the Caohai region of Dianchi Lake using multi-temporal Sentinel-2 images. *Remote Sensing*, 15(1), Article e2260.
<https://doi.org/10.3390/rs15092260>