






REMOTE SENSING IN THE SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS OF MANGROVE VIGOR WITH HYDROCLIMATIC VARIABILITY AND ENSO OCCURRENCE IN TUMBES-PERU

Ulises Francisco Giraldo Malca, Doctor¹, Fiorella Saleth Estela Chota², Griselda Bertila Reyes Lucas³, Valeria Rosario Vega Valer⁴, Daniel M. Alongi⁵
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, PERÚ, pcigugir@upc.edu.pe¹, u202319509@upc.edu.pe², u202319655@upc.edu.pe³, u20231b859@upc.edu.pe⁴, Tropical Coastal & Mangrove Consultants, Highview Court, Pakenham, Victoria, Australia, dmalongi@outlook.com⁵

Abstract— Mangroves stand out for their great biodiversity, carbon storage and provision of resources to the populations that depend on them, but they are also considered very vulnerable to anthropic pressures and alteration of hydroclimatic patterns derived from global warming and El Niño-Southern Oscillation, which break the balance they need for their optimal development, so it is necessary to know the effects of hydroclimatic variability on the phenological dynamics of mangroves to contribute to a better management of their ecosystems. To this end, the relationship of changes in their vigor with hydroclimatic variability and the occurrence of ENSO in the department of Tumbes in Peru during the period 2015-2024 was analyzed. For this purpose, Landsat images were processed by calculating the Normalized Difference Vegetation Index in Google Earth Engine, in addition to hydrometeorological data and the El Niño Coastal Index. The results show a slight decrease in mangrove vigor associated with the reduction in rainfall, but with a stable average NDVI and percentage of unvegetated areas throughout the analysis period, which would indicate the maintenance of forest expansion. It was also found that the increase in rainfall and runoff (especially in the middle basin) increased mangrove vigor in the following months. It is concluded that mangrove vigor is positively affected by the occurrence of ENSO, rainfall and higher baseflow of rivers in the premontane zones and negatively affected by the downward trend of rainfall in the basin.

Keywords—ICEN; mangroves; GEE; climate change; sediment load.

TELEDETECCIÓN EN EL ANÁLISIS ESPACIOTEMPORAL DE LA VIGOROSIDAD DE MANGLARES CON LA VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA Y OCURRENCIA DEL ENOS EN TUMBES-PERÚ

Ulises Francisco Giraldo Malca, Doctor¹, Fiorella Saleth Estela Chota², Griselda Bertila Reyes Lucas³, Valeria Rosario Vega Valer⁴, Daniel M. Alongi⁵.

Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, PERÚ, pcigugir@upc.edu.pe¹, u202319509@upc.edu.pe², u202319655@upc.edu.pe³, u20231b859@upc.edu.pe⁴,

Tropical Coastal & Mangrove Consultants, Highview Court, Pakenham, Victoria, Australia, dalongi@outlook.com⁵

Resumen— Los bosques de mangle desatacan por su gran biodiversidad, almacenamiento de carbono y provisión de recursos a poblaciones que dependen de ellos, pero también son considerados muy vulnerables frente a presiones antrópicas y a la alteración de patrones hidroclimáticos derivados del calentamiento global y El Niño-Oscilación del Sur que rompen el equilibrio que requieren para un desarrollo óptimo, por lo que es necesario conocer los efectos de la variabilidad hidroclimática en la dinámica fenológica del manglar que contribuya a una mejor gestión de sus ecosistemas. Con ese fin, se analizó la relación de los cambios en su vigorosidad con la variabilidad hidroclimática y la ocurrencia del ENOS en el departamento de Tumbes en Perú durante el periodo 2015-2024. Para ello, se procesaron imágenes Landsat mediante el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Google Earth Engine, además de data hidrometeorológica, y del Índice Costero de El Niño. Los resultados muestran un ligero descenso de la vigorosidad del manglar, asociado a la reducción en las precipitaciones, pero con un NDVI medio y porcentaje de zonas sin vegetación estables a lo largo de todo el periodo de análisis, que indicarían el mantenimiento de la extensión forestal. Asimismo, se encontró que el incremento de precipitaciones y caudales (especialmente de la cuenca media), elevan la vigorosidad de los manglares en los meses siguientes. Se concluye que la vigorosidad de los manglares es afectada positivamente por la ocurrencia de ENOS, lluvias y mayor flujo base de ríos en zonas premontanas, así como negativamente por la tendencia descendente de las precipitaciones en la cuenca.

Palabras clave—ICEN; manglares; GEE; cambio climático; carga sedimentaria.

I. INTRODUCCIÓN

Presentes en más de 118 países [1], los manglares representan zonas en el mundo con una alta concentración de biodiversidad [2]. Por lo general, se encuentran en regiones cálidas y húmedas, particularmente en zonas cercanas al ecuador y los trópicos, donde cumplen un papel clave en el equilibrio ecológico [3]. Estos ecosistemas se caracterizan por su vegetación adaptada a altos niveles de salinidad y funcionan como importantes reservas de carbono a nivel global [4].

Además, brindan otros servicios ecosistémicos indispensables como la protección de la erosión de las zonas costeras, la regulación de impactos climáticos, hábitat de especies de flora y fauna, o suministro de recursos para poblaciones humanas de sus alrededores [2], [5]. Sin embargo, a pesar de su importancia, estos ecosistemas costeros enfrentan amenazas antrópicas y naturales que ponen en riesgo tanto la dinámica de las especies como a las comunidades humanas que dependen directamente de sus servicios [6].

Los manglares se encuentran entre los ecosistemas más vulnerables del mundo, con tasas de pérdida global que oscilan entre el 1 % y el 2 % anual [7]. Al ubicarse en zonas de transición entre la tierra y el mar, estos ecosistemas son altamente sensibles tanto a los cambios climáticos como a las variaciones hidrológicas [2], [8]. Los manglares enfrentan múltiples factores de estrés frecuentemente, como modificaciones en la temperatura, alteraciones en los patrones de lluvia y periodos prolongados de sequía, los cuales pueden desencadenar pérdidas significativas [7]. En este sentido, los estudios de Takahashi y Martínez revelaron que los ciclos hidrológicos estacionales y las intrusiones de agua dulce controlan las condiciones fisicoquímicas del ecosistema de manglares, y estos factores se ven alterados y exacerbados durante eventos ENOS, lo que provoca una mayor vulnerabilidad ecológica de estos ecosistemas [9].

El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es un sistema climático interanual de carácter global que altera los vientos alisios en el Pacífico, reduciendo el afloramiento de aguas frías en la región oriental y generando un calentamiento anómalo de la superficie marina, lo que eleva el nivel del mar [10], así como el incremento extraordinario de precipitaciones y caudales en la vertiente occidental de la cordillera de los Andes en Sudamérica [11]. Para monitorear este fenómeno, en la región costera de Perú y Ecuador, el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) introdujo el Índice Costero El Niño, que mide las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) en la región Niño 1+2 [12]. Este índice se calcula como la media

móvil de tres meses de las anomalías de la TSM, donde los valores positivos que indican condiciones cálidas se mantienen por tres meses consecutivos se asocian con El Niño, mientras que valores negativos que reflejan condiciones frías se asocian con La Niña, según los rangos de -1.0 a $+0.4$ [13].

Con el acelerado cambio climático, este evento se estaría intensificando, pudiendo hasta duplicar su frecuencia, lo que provoca impactos significativos como la mortalidad de manglares debido a la expansión térmica (expansión de volumen), la elevación del nivel del mar y la exacerbación de otros factores de estrés climático como las olas de calor y la alteración de las precipitaciones [14]. El conjunto de estas alteraciones plantea una amenaza para la supervivencia de los manglares a largo plazo, pues intensifica los impactos tanto en el entorno inmediato de estos ecosistemas como en las cuencas hidrográficas que los sostienen [4]. En este contexto, los factores hidroclimáticos de las cuencas hidrográficas compartidas entre Ecuador y Perú son especialmente vulnerables a la intensificación de los eventos del ENOS [15]. Esto se evidencia en particular en la región de Tumbes en la costa norte peruana, donde este fenómeno genera un aumento significativo de las lluvias, provocando inundaciones debido al incremento del caudal de los ríos [10], que pueden alcanzar hasta 20 veces su nivel normal [6].

En el Perú, las regiones de Piura y Tumbes, en la costa norte, son las que albergan el ecosistema de bosques de manglar [16], siendo el área más significativa los manglares de Tumbes, pues cuenta con el área más grande, mayor cantidad de estudios de flora y fauna, así como medidas de preservación mejor implementadas [17]. Este ecosistema depende de la dinámica hidrológica de los ríos Tumbes y Zarumilla, influenciadas por la variabilidad climática, especialmente por los efectos del ENOS [15], un proceso natural clave que regula sus condiciones ecológicas [18]. Sin embargo, los manglares no solo enfrentan amenazas naturales, sino que, como señalan Gitau et al., la actividad antropogénica altera los procesos biogeoquímicos en estos ecosistemas, lo que puede llevar a una significativa disminución de su área [4]. En el caso particular de Tumbes, hasta el 2007 el 17 % de los bosques de manglares fueron sustituidos por granjas camaroneras, además de afectar otras coberturas vegetales [19].

Las áreas naturales protegidas (ANP) en Perú son espacios legales, terrestres o marinos, destinados a conservar la biodiversidad y promover el desarrollo sostenible [20], como el Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes (SNLMT), que fue establecido el 2 de marzo de 1988 mediante Decreto Supremo N° 018-88-AG, como una ANP de uso indirecto, en respuesta a las crecientes amenazas que enfrentaba este tipo de ecosistema, incluyendo la deforestación y actividades de producción de camarones [6]. Actualmente el SNLMT sustenta una importante diversidad biológica, que incluye especies endémicas de aves, peces, crustáceos (camarones y cangrejos), reptiles amenazados y mangles, como especies de flora predominante [20].

La teledetección se presenta como una tecnología útil para el monitoreo y protección de manglares [21]. Las imágenes satelitales captadas por sensores como Sentinel y Landsat, han permitido un mapeo preciso de los cambios en estas coberturas vegetales a lo largo del tiempo [22], [23], facilitando la identificación de cambios estructurales y funcionales del paisaje, además de proporcionar resoluciones espaciales y temporales diversas, posibilitando el análisis de dinámicas de largo plazo [22], [23]. En este contexto, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se ha consolidado como uno de los indicadores clave en el ámbito de la teledetección debido a su capacidad sobresaliente para resaltar la vegetación [24], como la presencia de bosques tropicales (de vegetación vigorosa y densa) que de acuerdo con Carbajal-Morán & Onofre-Enriquez sus valores fluctúan entre 0.6 y 0.8 [25]. Su integración con datos de series temporales han demostrado ser herramientas fundamentales para evaluar las perturbaciones en la vegetación asociadas a fenómenos naturales, como el ENOS [21]. Además, herramientas avanzadas como Google Earth Engine y los algoritmos de aprendizaje automático potencian estas capacidades, permitiendo un análisis multitemporal eficiente y detallado, para comprender mejor la dinámica de este tipo de ecosistemas frente a eventos extremos [21].

En ese sentido, las herramientas de teledetección permiten analizar cómo las variaciones climáticas e hidrológicas afectan a los manglares, facilitando la identificación de áreas más vulnerables a eventos climáticos extremos [10]. Al respecto Pérez et al., presenta una comparación de la dinámica biogeoquímica de los manglares durante la estación seca y húmeda en el SNLMT, influenciados por la variación del caudal del río Zarumilla, destacando que los cambios estacionales afectan la cobertura del manglar, porque en la época seca, la estabilidad sedimentaria favorece la acumulación de materia orgánica, mientras que, en la húmeda, la inestabilidad generada por el incremento del caudal, remueve sedimentos acumulados y mejora la calidad del hábitat [26].

Por tanto, los eventos asociados al ENOS o al calentamiento global, generan cambios significativos en la temperatura del agua, las precipitaciones, altura del mar y niveles de salinidad, lo que provoca erosión, desbordamientos de ríos y cambios en los suelos, alterando las condiciones ambientales de estos ecosistemas de gran valor económico para los pobladores de Tumbes, quienes depende de los recursos que estos brindan [6]. Estos cambios también afectan la provisión de servicios ecosistémicos fundamentales, como alimentos, regulación morfosedimentaria, regulación de salinidad, soporte de biodiversidad y el paisaje, además del valor cultural y educativo que tienen para lugareños y visitantes [27], por lo que es necesario entender como varía la fenología de los manglares frente a los cambios climáticos, hidrográficos y oceánicos que se han presentado en los últimos años para tomar medidas más eficientes en favor de su conservación. En este sentido, el objetivo de la presente investigación es analizar la relación de los cambios en la vigorosidad vegetal de los manglares con la

variabilidad hidrológica y la ocurrencia del ENOS en el departamento de Tumbes durante el periodo 2015-2024.

II. ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se llevó a cabo en las zonas de distribución de bosques de manglar del departamento de Tumbes, de acuerdo con el Mapa Nacional de Ecosistemas de Perú al 2018 [28], y el Mapa Nacional de Cobertura Vegetal de Perú de 2015 [29], dentro del cuadrante definido por las coordenadas geográficas: 3°23'18.7"S - 3°46'30.4"S de latitud, y 80°13'09.0"W - 80°31'03.6"W de longitud (Fig. 1).

La cuenca del río Tumbes se encuentra en el extremo norte del Perú, extendiéndose desde las cabeceras en los páramos de Chilla y Cerro Negro, zona de Portovelo, Ecuador, hasta su desembocadura en el océano Pacífico, recorriendo 230 km en territorio peruano. Por su parte, la cuenca del río Zarumilla nace en la Cordillera Tahuin, Ecuador, su recorrido en Perú es de 62,6 km y en su desembocadura, forma islas de manglares, un ecosistema de gran biodiversidad que integra el SNLMT [30].



Fig. 1 Distribución de bosques de manglares en el departamento de Tumbes (área de estudio) y ubicación de estaciones hidrometeorológicas utilizadas.

Por un lado, el río Zarumilla que constituye parte de la frontera entre Ecuador y Perú, que, al tener una variación interanual de precipitación muy amplia, alterna periodos de sequía e inundaciones, permaneciendo seco durante la mayor parte del año y por lo general con escorrentía solo entre los meses de enero a marzo [31]. Por otro lado, el río Tumbes tiene un régimen permanente de agua, con caudales medios mensuales que fluctúan entre 7.7 m³/s a 1,244.2 m³/s, con una media de 116.3 m³/s, de acuerdo con los registros de la estación El Tigre (1965 – 2004). Además, su pendiente promedio es de 1.5 %, y 0.5 % en los últimos 40 km de su recorrido, formando la llanura del río Tumbes, zona que por sus características es frecuentemente inundada. En su curso, este río transporta un promedio de 1,56 hm³/año de sedimentos, los cuales se acumulan principalmente en los bancos de su estuario, dando lugar a la formación de islas que posteriormente son colonizadas por manglares [30].

El clima predominante en esta región es subtropical, influenciado por la interacción entre la corriente fría de

Humboldt y la corriente cálida de El Niño. Estas condiciones generan periodos alternados de lluvias intensas y sequías prolongadas, con precipitaciones que varían entre 100 y 3,800 mm anuales. Según la clasificación climática de Charles Warren Thornthwaite, las estaciones meteorológicas (EM) de la región como: Puerto Pizarro (6 m.s.n.m.), Papayal (50 m.s.n.m.), Rica Playa (68 m.s.n.m), El Salto (4 m.s.n.m.) y La Cruz (6 m.s.n.m.) presentan un clima seco árido, con nulo exceso de agua, megatérmico o cálido y una eficiencia térmica inferior al 48% durante los meses de verano (29% - 32%). Estos resultados evidencian la uniformidad del clima en el área de estudio, donde únicamente la EM de Cabo Inga (228 m.s.n.m) presenta un clima semiárido seco, con moderado exceso de agua en verano, megatérmico y baja concentración de eficiencia térmica en verano (27%), debido a una mayor altitud y por estar ubicada a una mayor distancia desde el litoral.

En los alrededores de las localidades de Tumbes y Zarumilla se desarrollan actividades agrícolas, pesqueras y acuícolas (camarones) principalmente, así como una intensa actividad comercial, y turística por la colindancia con el vecino país de Ecuador [32], que producto del desarrollo económico y la demanda de alimentos constituyen factores de presión sobre los bosques de mangle por la expansión de la frontera agrícola, extracción de recursos y la construcción de pozas camaroneras [27].

Los manglares de Tumbes se caracterizan por presentar un relieve uniforme, casi plano, con pendientes suaves entre 1% y 5%. Estas características fisiográficas están directamente relacionadas con los aportes sedimentarios de los ríos Tumbes y Zarumilla, que dan forma a una planicie litoral compuesta por materiales de origen marino y fluvial [33]. Su territorio forma parte de las regiones biogeográficas del Mar Tropical del Pacífico y el Bosque Seco Ecuatorial, cuyos ecosistemas son refugio para diversas especies de flora y fauna, adaptadas a condiciones salinas periódicamente inundadas. La interacción de factores climáticos y fisiográficos, junto con los aportes de agua dulce y sedimentos, garantiza un ambiente altamente productivo y biodiverso, capaz de soportar una rica comunidad de especies residentes y migratorias, incluyendo peces, crustáceos, aves, y mamíferos [33].

III. MÉTODOS

La presente investigación es de tipo cuantitativa, descriptiva y correlacional, en la que se aplicó técnicas estadísticas y de informática. Se emplearon fuentes confiables para la búsqueda de información, tales como artículos científicos extraídos de bases de datos reconocidas, entre ellas SCOPUS, Web of Science, Dialnet, Scielo, entre otras, además de reportes de instituciones gubernamentales e internacionales como el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Instituto del Mar del Perú, Instituto Geofísico del Perú, Ministerio del Ambiente, Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) y University of Hawaii Sea Level Center.

A. Variación de la vigorosidad del ecosistema de manglar en el departamento de Tumbes

Se realizó con el procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8/9 OLI/TIRS Collection 2, mediante un código JavaScript en Google Earth Engine (GEE), generado en base a guías de desarrolladores de GEE para NDVI [34], Composición y Mosaicos [35], de corrección atmosférica (calibrated top-of-atmosphere - TOA) y de reflectancia, así como el enmascaramiento de nubes. Se obtuvo imágenes NDVI correspondientes al cuadrante definido por las latitudes -3.591° y -3.357° , y longitudes -80.545° y -80.203° , seleccionando la mejor imagen disponible para cada mes durante el período 2015 a 2024. Las escenas seleccionadas que no pudieron ser procesadas a través de GEE, fueron obtenidas de la plataforma *GloVis* y procesadas en el software QGIS. Sin embargo, al procesarlas, los valores obtenidos diferían de los resultados de las imágenes de GEE (alteraban la precisión), por lo que se excluyeron del análisis.

El registro de los resultados de NDVI máximo, mínimo, medio, desviación estándar y covarianza de cada escena se obtuvo tras la extracción de las imágenes NDVI al ámbito constituido por la combinación de las zonas catalogadas como “manglar” en el Mapa de Ecosistemas del Perú al 2018 [28] y Mapa Nacional de Cobertura Vegetal al 2015 [29], mediante el programa ArcMap 10.x.

Finalmente, se clasificaron las escenas NDVI para diferenciar, medir las extensiones y determinar proporciones correspondientes a cuerpos de agua y zonas sin cobertura vegetal (NDVI < 0.1), cobertura vegetal no vigorosa (0.1 < NDVI < 0.6), y cobertura vegetal vigorosa (NDVI > 0.6), cuyos datos fueron procesados y analizados en hojas de cálculos Microsoft Excel y el software estadístico Minitab.

Se generaron 196 puntos de muestreo con una separación de 500 metros entre ellos en el software QGIS, empleando la herramienta de “generación de puntos aleatorios dentro del polígono” para una distribución homogénea en el área de estudio. Se tomó como referencia la capa de área de manglar. En cada punto se extrajeron los valores NDVI de los píxeles sobre los que se ubican en cada escena, lo que permitió tener un registro de las variaciones del nivel de vigorosidad vegetal en cada uno de esos lugares para su análisis en función de la variabilidad hidroclimática y la ocurrencia del ENOS. Estos datos fueron organizados y procesados en una tabla dinámica Microsoft Excel para su análisis. Además, se empleó Google Earth Pro para corroborar cambios espaciotemporales que se hayan dado en el territorio en puntos de muestreo que evidenciaron fuerte variabilidad en los valores NDVI.

B. Variación climática e hidrológica

La recopilación de datos se realizó a partir de tres estaciones meteorológicas y tres estaciones hidrológicas obtenidas del portal web del SENAMHI (Tabla I). Estas estaciones fueron seleccionadas por ubicarse al interior de la cuenca del río Tumbes, distribuidas en las secciones baja, media y más alta del río Tumbes al interior del territorio peruano. Los datos fueron procesados utilizando tablas dinámicas en

Microsoft Excel para analizar la variación temporal de temperaturas, humedad relativa, precipitación y niveles del río, los cuales fueron cargados en el software Minitab para identificar los coeficientes de correlación de Pearson significativas con las otras variables.

C. Ocurrencia del ENOS

Se descargó las mediciones del ICEN para el periodo de estudio de la plataforma web de IMARPE. La data disponible por meses se procesó con una tabla dinámica en Microsoft Excel para calcular los promedios mensuales dentro del periodo de análisis. Estos datos fueron comparados con las variables que reflejan cambios en la vegetación, según los registros de la ocurrencia de los eventos ENSO [36].

TABLA I
ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS PROCESADAS EN LA CUENCA BAJA Y MEDIA DEL RÍO TUMBES

| Nombre | Distrito | Latitud | Longitud | Altitud m.s.n.m |
|-----------------------|--------------------|---------------|----------------|-----------------|
| Playa Rica (EMA) | Pampas de Hospital | 3°48'48" S | 80°27'27" W | 113 |
| Campamento Sede (EMA) | Tumbes | 3°33'4.14" S | 80°25'46.64" W | 17 |
| Cabo Inga (EMA) | San Jacinto | 3°58'33.39" S | 80°24'6.54" W | 231 |
| El Tigre (EHC) | San Jacinto | 3°46'6.54" S | 80°27'24.67" W | 44 |
| Puente Tumbes (EHA) | Tumbes | 3°34'15.16" S | 80°27'39.14" W | 10 |
| Cabo Inga (EHA) | San Jacinto | 3°58'43.44" S | 80°23'57.77" W | 160 |

D. Variación del nivel del mar

Se realizó con datos del observatorio SEA LEVEL CENTER de la universidad de Hawai'i, correspondientes a las estaciones de Talara en Perú (092; latitud -4.58200 , longitud -81.28200 ; 2015/05/31 – 2024/12/31) y La Libertad en Ecuador (091-172; latitud -2.20000 , longitud -80.91700 ; 1949/09/02 – 2024/12/31) [37]. Estos fueron procesados en hojas de cálculo y tablas dinámicas de Microsoft Excel.

IV. RESULTADOS

Tras procesar las imágenes NDVI, se observa que los valores máximos (vegetación con mayor vigorosidad) fluctúan alrededor de 0.8, presentando una ligera tendencia negativa en el tiempo. También se aprecia que el NDVI medio oscila alrededor de 0.4 y 0.5, sugiriendo una condición moderadamente estable del manglar con una muy baja varianza (0.0026). En el caso del NDVI mínimo (asociado a la turbidez del agua), muestra valores entre -0.2 y -0.8 , con algunos picos ocasionales que se acercan a 0, mostrando una tendencia lineal incremental a lo largo del tiempo.

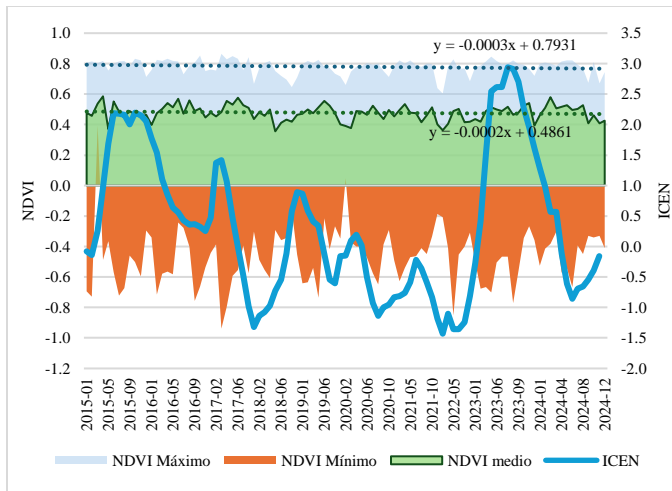


Fig. 2 Evolución de los valores de NDVI en la zona de manglar y el Índice del Niño Costero.

Ante estos resultados, la revisión de la dinámica temporal de los cambios en la distribución de rangos de vigorosidad en los manglares de Tumbes mostró que la vegetación vigorosa ocupa generalmente entre 40% y 60% del área total, mientras que la vegetación no vigorosa varía aproximadamente entre 24% y 45%. Finalmente, las áreas sin cobertura vegetal o correspondientes a cuerpos de agua, ocupan menos del 17% (Fig. 3), mostrando una tendencia estable ($y=4E-05x+0.1226$), sin un claro incremento o decremento a lo largo del periodo de análisis.

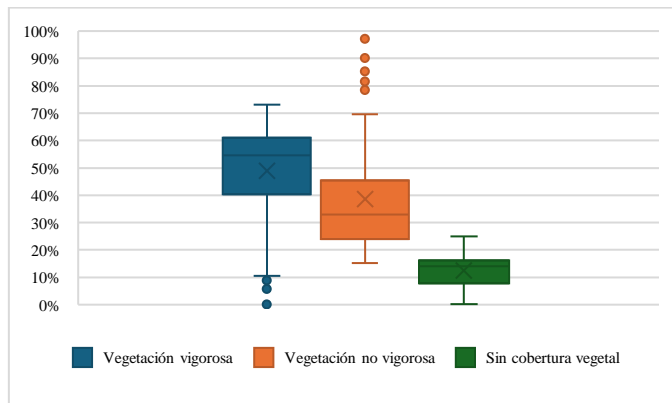


Fig. 3 Distribución de porcentajes por tipos de cobertura vegetal en la zona manglar.

Al comparar los resultados de NDVI máximos, medios y mínimos se obtuvo una fuerte correlación inversa entre el valor máximo y el valor mínimo ($r=-0.747$; $p\text{-value}<0.001$), moderadamente fuerte entre el máximo y el medio ($r=0.647$; $p\text{-value}<0.001$), e inversamente moderada entre el valor medio y el mínimo ($r=-0.346$; $p\text{-value}<0.001$).

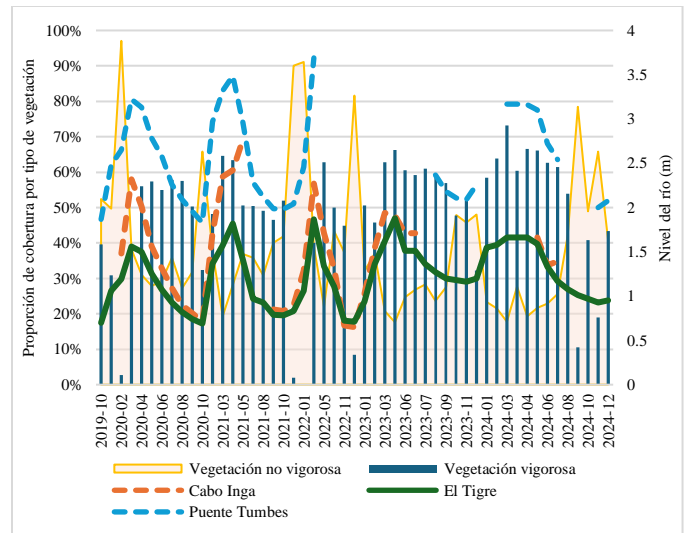


Fig. 4: Evolución de la cobertura de vegetación y mínimo nivel del río en las diferentes EH (2019-2024).

Del procesamiento de las EH, se encontró que las correlaciones más altas se dan entre el porcentaje de vegetación no vigorosa con el nivel medio, promedio de mínimos y valor mínimo del río Tumbes, siendo las correlaciones con el porcentaje de vegetación vigorosa, ligeramente menores. Como se aprecia en la Tabla II, la correlación más alta se da entre el porcentaje de vegetación no vigorosa con el mínimo nivel, lo que indicaría que la vigorosidad de la vegetación se ve impactada frente a eventos que cambien el flujo base del río, el cual viene a ser normalmente el nivel del acuífero local.

De acuerdo con esos resultados, los niveles registrados en la EH El Tigre tienen correlaciones más fuertes y significativas en relación con los resultados que se obtienen para la EH Puente Tumbes y la EH Cabo Inga, siendo inversas con el porcentaje de vegetación no vigorosa y directa con el porcentaje de vegetación vigorosa. Adicionalmente, se destaca que estas correlaciones más fuertes ocurren en el tramo medio del río, correspondiente a una zona premontana donde el curso de agua sale de un valle interandino e ingresa a la penillanura costera de Tumbes.

Al revisar la dinámica de variación del nivel del río Tumbes y contrastarla con la dinámica de la vigorosidad de la vegetación en el área de estudio (Fig. 4), se puede observar que los valores más altos de porcentaje de la vegetación no vigorosa se presentan meses antes de los incrementos más fuertes en el nivel mínimo del río, y un mes después se producen las subidas más notorias del porcentaje de vegetación vigorosa. En ese sentido, al comparar los datos de niveles del río con los porcentajes de vegetación vigorosa y no vigorosa de un mes posterior, se encuentra que todas las correlaciones se incrementan y se vuelven significativas (Tabla III).

TABLA II

CORRELACIONES DE PEARSON ENTRE LOS REGISTROS DE NIVEL DEL RÍO TUMBES EN LAS EH CON LOS PORCENTAJES DE VEGETACIÓN NO VIGOROSA (0.6 > NDVI > 0.1) Y VEGETACIÓN VIGOROSA (NDVI > 0.6)

| | Nivel del río | Puente Tumbes | | El Tigre | | Cabo Inga | |
|------------------------|---------------------|---------------|---------|----------|---------|-----------|---------|
| | | r | p-value | r | p-value | r | p-value |
| Vegetación no vigorosa | Medio mensual | -0.321 | 0.056 | -0.47 | 0 | -0.524 | 0.076 |
| | Promedio de mínimos | -0.334 | 0.047 | -0.49 | 0 | -0.345 | 0.057 |
| | Mínimo mensual | -0.384 | 0.021 | -0.52 | 0 | -0.37 | 0.035 |
| Vegetación vigorosa | Medio mensual | 0.277 | 0.102 | 0.434 | 0.001 | 0.275 | 0.135 |
| | Promedio de mínimos | 0.29 | 0.086 | 0.456 | 0.001 | 0.298 | 0.103 |
| | Mínimo mensual | 0.345 | 0.04 | 0.501 | 0 | 0.342 | 0.059 |

Al analizar la evolución de las condiciones climáticas que se presentaron en la cuenca del río Tumbes dentro del periodo de análisis, llamó la atención la marcada tendencia de reducción de las precipitaciones en las 3 EM (Fig.5), siendo más intensa en la EM Cabo Inga, la más alta y alejada del mar ($y = -0.9145x + 114.46$), seguida por la EM Rica Playa, en su sección media ($y = -0.6351x + 77.925$), y con una reducción más baja la EM Campamento Sede, próxima al delta del río ($y = -0.3805x + 46.096$).

Tras probar la correlación entre precipitaciones mensuales en la EM Cabo Inga con los valores NDVI, se encontró que la combinación con mayor relación fue del NDVI medio correspondiente a 2 meses después, ascendiendo a un valor moderado ($r = 0.529$; $p\text{-value} < 0.001$). Asimismo, al comparar el NDVI medio y el porcentaje de vegetación vigorosa con la precipitación acumulada de meses previos, se identificó las correlaciones más fuertes con las precipitaciones de los últimos 4 meses ($r = -0.564$, $p\text{-value} < 0.001$ y $r = 0.401$, $p\text{-value} < 0.001$ respectivamente).

TABLA III

CORRELACIONES DE PEARSON ENTRE LOS REGISTROS DE NIVEL DEL RÍO TUMBES EN LAS EH CON LOS PORCENTAJES DE VEGETACIÓN NO VIGOROSA (0.6 > NDVI > 0.1) Y VEGETACIÓN VIGOROSA (NDVI > 0.6) CORRESPONDIENTES AL MES SIGUIENTE

| | Nivel del río | Puente Tumbes | | El Tigre | | Cabo Inga | |
|------------------------|---------------------|---------------|---------|----------|---------|-----------|---------|
| | | r | p-value | r | p-value | r | p-value |
| Vegetación no vigorosa | Medio mensual | -0.449 | 0.007 | -0.57 | 0 | -0.525 | 0.002 |
| | Promedio de mínimos | -0.461 | 0.005 | -0.579 | 0 | -0.543 | 0.002 |
| | Mínimo mensual | -0.51 | 0.002 | -0.59 | 0 | -0.517 | 0.003 |
| Vegetación vigorosa | Medio mensual | 0.482 | 0.003 | 0.606 | 0 | 0.525 | 0.002 |
| | Promedio de mínimos | 0.494 | 0.003 | 0.616 | 0 | 0.544 | 0.002 |
| | Mínimo mensual | 0.54 | 0.001 | 0.629 | 0 | 0.534 | 0.002 |

En el caso de los datos de la EM Rica Playa la correlación de la precipitación con el NDVI medio de 2 meses después fue menor a la registrada en el EM Cabo Inga ($r = 0.414$, $p\text{-value} < 0.001$). Sin embargo, registro mayores correlaciones, entre la suma de las precipitaciones de los últimos 4 meses con del NDVI medio ($r = -0.587$, $p\text{-value} < 0.001$) y con el porcentaje de vegetación vigorosa ($r = 0.454$; $p\text{-value} < 0.001$).

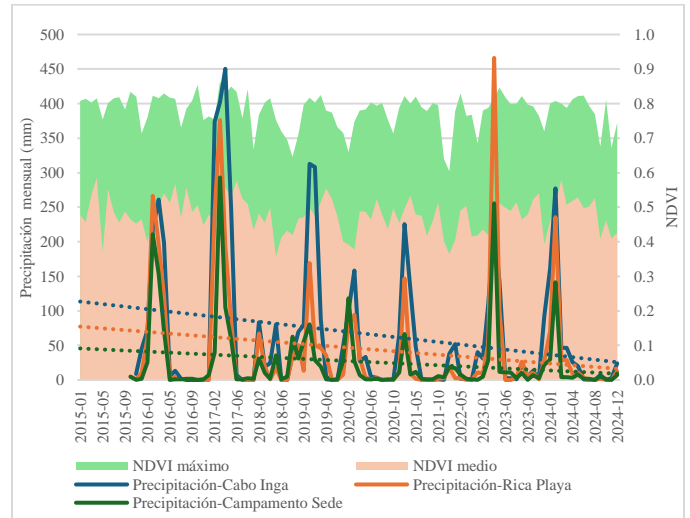


Fig. 5 Variación de la precipitación y NDVI en las diferentes EM (2015-2024).

En el caso de los datos de la EM Campamento Sede la correlación de la precipitación con el NDVI medio de 2 meses después fue más baja que las anteriores ($r = 0.337$, $p\text{-value} = 0.002$), al igual que las relaciones de las precipitaciones de los últimos 4 meses con el NDVI medio ($r = -0.523$, $p\text{-value} < 0.001$) y del porcentaje de vegetación vigorosa ($r = 0.377$, $p\text{-value} < 0.001$).

Asimismo, se encontraron correlaciones inversas moderadas significativas entre el NDVI mínimo y la precipitación en las EM Campamento Sede ($r = -0.337$; $p\text{-value} = 0.002$), Rica Playa ($r = -0.378$; $p\text{-value} < 0.001$) y Cabo Inga ($r = -0.371$; $p\text{-value} < 0.001$).

En cuanto al impacto que tiene el ENOS sobre los ecosistemas del área de estudio, se encontró que el ICEN arrojó correlaciones moderadas, teniendo resultados más altos con el porcentaje de vegetación vigorosa que se presenta 2 meses después ($r = 0.364$; $p\text{-value} < 0.001$), de forma inversa con el porcentaje de vegetación no vigorosa ($r = -0.335$; $p\text{-value} = 0.001$) y con el NDVI medio que se presenta 4 meses después ($r = -0.343$; $p\text{-value} = 0.001$), mientras que en el caso de la correlación con el NDVI máximo, presenta el valor más alto un mes después del reporte ICEN ($r = 0.335$; $p\text{-value} = 0.001$). Asimismo, se observa el impacto que tiene los ENOS de 2015-2016, cuando el ICEN tuvo un promedio de 1.53, al provocar que a partir del segundo trimestre de 2015, disminuyera el porcentaje de vegetación no vigorosa con un promedio de 33% para el periodo que duró el evento, de igual forma ocurrió durante el ENOS 2016-2017 con un promedio de 34%, siendo más fuerte para el ENOS 2023-2024 con un promedio de 29%, mientras que en los periodos sin presencia de ENOS moderados a fuertes el promedio se aproxima a 42%. Por el contrario, el porcentaje de vegetación vigorosa se incrementa con la ocurrencia de ENOS moderados y fuertes fluctuando entre 53% y 57%, mientras que en periodos sin presencia del ENOS su porcentaje esta alrededor del 46% (Tabla IV).

TABLA IV
INCIDENCIA DE LOS EVENTOS ENOS SOBRE PORCENTAJES DE
COBERTURA VEGETAL Y NDVI DEL ÁREA DE ESTUDIO

| Evento ENOS | Vegetación vigorosa (promedio) | Vegetación no vigorosa (promedio) | Número de meses | Promedio NDVI máximo | NDVI medio | Promedio ICEN |
|----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------|----------------------|------------|---------------|
| 2015-2016 (Fuerte) | 53% | 33% | 16 | 0.797 | 0.487 | 1.531 |
| 2016-2017 (Moderado) | 55% | 34% | 6 | 0.812 | 0.500 | 0.958 |
| 2018-2019 (Débil) | 40% | 50% | 5 | 0.755 | 0.466 | 0.668 |
| 2023-2024 (Fuerte) | 57% | 29% | 14 | 0.797 | 0.492 | 1.835 |
| Sin ENOS | 46% | 42% | 56 | 0.770 | 0.470 | -0.531 |

Al procesar los resultados de los puntos de muestreo, que registran los valores NDVI de un mismo píxel (lugar) en todas las escenas analizadas, se identificó aquellos que tienen una marcada variación en su evolución temporal de forma ascendente como descendente que implican cambios en el tipo de cobertura vegetal, cuyos resultados se detallan a continuación:

En el caso del punto de muestreo 117, ubicado en la zona litoral del SNLMT, en los primeros meses presenta valores negativos, que corresponderían a cuerpos de agua (2015/01-2016/11) con un promedio de NDVI de -0.066. En los años siguientes no presenta valores negativos, sino valores que se incrementan progresivamente por debajo de 0.3 hasta 2023/02, con un valor promedio de NDVI 0.199 que corresponderían a suelos desnudos y vegetación dispersa. A partir de 2023/03 el NDVI se incrementa significativamente hasta un máximo de 0.61 y mantiene valores por encima de 0.3 hasta 2024/03, con un promedio de 0.504. En los últimos meses, desde 2024/04, el NDVI desciende a valores entre 0.3 y 0.13 con un promedio de 0.216. Caso similar se presenta en el punto 62 que tiene un incremento del NDVI de valores bajos (correspondientes a suelo sin cobertura), a valores por encima de 0.5 (correspondientes a vegetación vigorosa).

El punto de muestreo 105 que se encuentra próximo al río Tumbes, fuera del SNLMT y su zona de amortiguamiento, al inicio del periodo de análisis presentaba valores altos de NDVI que indicarían la presencia de un bosque de manglar (2015/01-2017/05) con 0.566 de promedio. En los meses siguiente, desde 2017/10 con un valor de 0.376, se evidencia un descenso notorio hasta 2023/02 con un NDVI medio de 0.246 que correspondería a un terreno sin presencia de bosque manglar (vegetación no vigorosa). En este periodo, observando imágenes históricas de Google Earth Pro, se aprecia deforestación en el lugar entre 2017/08 y 2018/12. A partir del 2023/03, el NDVI presenta valores negativos con un promedio de -0.064 hasta 2023/06, lo cual indica la presencia de agua, asociada a una poza de producción de camarones. Posteriormente, desde 2023/07, los valores se incrementan a valores positivos y mantienen un promedio de 0.148 que correspondería a un terreno desnudo o con escasa vegetación dispersa.

Algunos sectores fueron catalogados como manglares en los mapas de referencia, pero en la realidad corresponderían a otros tipos de cobertura vegetal como el caso del punto 146, que corresponde a un bosque seco que muestra un incremento del NDVI medio de 0.3 en los primeros meses (2015/01-2016/01) hasta 0.54 en los últimos meses (2023/12- 2024/12), pero presentando una marcada variación entre la estación húmeda y los meses de la estación seca de cada año.

Finalmente, se pudo determinar que no existirían correlaciones significativas entre los parámetros de temperatura de las estaciones analizadas, o la variación de nivel del mar, con los resultados NDVI y los porcentajes de cobertura vegetal, asociados al estado fenológico de los bosques de manglar.

V. DISCUSIÓN

La ligera tendencia negativa que presenta el NDVI máximo y, en menor medida, el NDVI medio (Fig. 2) a lo largo del periodo de análisis, puede tener su explicación en la reducción de las precipitaciones que se está produciendo en la cuenca del río Tumbes, definido por la línea de tendencia que muestra en el tiempo (Fig. 5), siendo más intensa en la cuenca alta, principal proveedora de agua para la red hídrica.

La fuerte correlación inversa que presentan los valores NDVI máximo y mínimo, indicarían que cuando los cuerpos de agua tienen un NDVI más elevado (mayor turbiedad), provocan la disminución de la vigorosidad de la vegetación más vigorosa en el ámbito (bosques de mangle), dando a entender que las avenidas o crecidas (altamente turbias) afectarían la fenología de las plantas, reduciendo su vigorosidad. Sin embargo, al hacer la validación visual de los resultados con las imágenes satelitales, y verificando fechas de las escenas que registraron los valores más altos y más bajos, nos percatamos que en realidad corresponde a un sector de pozas de producción de camarones y no a ríos o estuarios, cuyos valores presentaban ese comportamiento porque en temporadas secas las pozas no tienen agua o su nivel es muy bajo, y en temporadas de lluvias son llenadas nuevamente, por ello al estar estancadas, los sedimentos rápidamente se profundizan reduciendo bastante sus niveles de reflectividad. Por el contrario, en el caso de ríos se verifico que en las temporadas de avenidas su NDVI aumenta producto de la mayor carga sedimentaria, mientras que en la época de estiaje el NDVI disminuyen al reducir su nivel de reflectancia, pero de manera moderada.

La poca variación que presentan los valores de NDVI máximo y NDVI medio indican que dentro del período de estudio no se han producido grandes cambios en los ecosistemas de los manglares en Tumbes, porque los valores del NDVI máximo de cada escena indican el nivel de cambio fenológico que ha tenido la vegetación más vigorosa del área de estudio (manglar), que solo puede ser afectada por intensos eventos climáticos como sequías o inundaciones, o por un agresivo cambio de uso en el suelo que afecte a toda la vegetación más vigorosa del territorio (eliminación del bosque) [2], [6], [38]. Asimismo, en el caso del NDVI medio, es un mejor indicador del estado general del territorio, donde se verán

reflejados los efectos que tendrán las variaciones climáticas e hidrológicas sobre todos los tipos de coberturas vegetales, así como de las intervenciones que haga el ser humano en determinados sectores del espacio, como deforestación parcial o implementación de infraestructura [39], [40]. En ese sentido, la baja variabilidad del porcentaje correspondiente a zonas sin cobertura vegetal o cuerpos de agua también es un claro indicador que dentro del periodo de análisis no se tuvieron pérdidas significativas en las extensiones cubiertas de vegetación, como las generadas por procesos de cambios en el uso del suelo.

En la Tabla II se observa que el porcentaje de vegetación no vigorosa presenta una relación inversa moderada con el nivel del río Tumbes en sus diferentes estaciones hidrométricas, que indica, que un mayor caudal del río provoca una reducción del área cubierta con vegetación no vigorosa, que se debería a la mayor disponibilidad de agua por precipitaciones y la recarga de acuíferos (asociadas al incremento de los caudales), que será aprovechada por la vegetación natural, mejorando su estado fenológico (reverdecimiento), convirtiendo parte de su extensión en vegetación vigorosa, lo que explicaría la alta correlación inversa entre los porcentajes de vegetación no vigorosa con vegetación vigorosa ($r=-0.962$; $p\text{-value}<0.001$). Este fenómeno, también puede ser explicado con el hallazgo de Pérez et al., al indicar que, en la estación seca, la acumulación de materia orgánica puede afectar la oxigenación del sistema, provocando estrés en la vegetación, mientras que, en época de crecidas, la descomposición de materia orgánica se acelera, así como su remoción, y permitiendo una mayor oxigenación de los sedimentos [41].

Asimismo, la EH El Tigre ubicada en la sección media del río Tumbes, correspondiente a una zona premontana (transición entre la llanura costera y las estribaciones andinas) de clima desértico, destaca por tener las correlaciones más altas y de mejor significancia con los porcentajes de vegetación. Ello se debería a los incrementos del caudal del río Tumbes que se producen por precipitaciones esporádicas que afectan las áridas estribaciones andinas del sector, que solo ocurren cuando hay un evento ENOS, a diferencia de las crecidas que se dan todos los años por las precipitaciones en la cuenca alta. Esta hipótesis que se confirmaría con la correlación moderada que presenta el nivel mínimo (nivel del acuífero) del río Tumbes en EH El Tigre con el ICEN ($r=0.416$; $p\text{-value}=0.002$), y por tener las correlaciones más altas y significantes con referencia a las otras EH.

Como se observa en la Tabla III, las correlaciones entre los niveles del río en las tres EH y los porcentajes de cobertura vegetal de unos meses después son más altas, entre moderadas a moderadamente fuertes. Este resultado muestra el tiempo que transcurre desde la crecida de los ríos hasta el incremento del NDVI o del porcentaje de vegetación vigorosa, lo cual correspondería al periodo necesario para que el agua hidrate las zonas bajas de la cuenca (mediante la infiltración y recarga de acuíferos) y sea aprovechada por las plantas, además de la

asimilación de los sedimentos transportados por las avenidas, resultando en una mejora de su vigorosidad.

Al respecto, los sedimentos que llegan al delta del río Tumbes normalmente provienen de la cuenca alta, donde se producen las lluvias y erosión de suelos por escorrentía, a diferencia de los que ocurre durante un ENOS, donde el incremento de las precipitaciones se concentran principalmente en las yungas marítimas (estribaciones próximas a la costa) como las presentes en los alrededores de la EH El Tigre, donde la producción sedimentaria es mayor por la menor cobertura vegetal que tienen sus suelos. En cambio, la EH de Cabo Inga al estar más alejada del litoral y a una mayor altura, reflejan mejor la dinámica hidrológica de la cuenca alta (en Ecuador), cuyas precipitaciones son más frecuentes en estación húmeda y dependen menos de la ocurrencia de un ENOS.

Finalmente, las correlaciones ligeramente más bajas en la EH Puente Tumbes, se deberían a las pérdidas o ganancias de agua que generan otros factores en su recorrido por la penillanura costera, como la desembocadura de otros tributarios, evapotranspiración, infiltración, desbordes y la extracción antrópica de agua.

La correlación moderada entre el ICEN y los dos porcentajes de cobertura vegetal, evidencian la influencia que tienen los eventos ENOS en la salud de los ecosistemas. En ese sentido el ascenso del ICEN en 2015 y 2023, por los dos eventos de magnitud fuerte, estuvieron asociados a la reducción del porcentaje de vegetación no vigorosa y el incremento del porcentaje de vegetación vigorosa, mientras que, en 2017, un descenso en el ICEN precedió al incremento del porcentaje de vegetación no vigorosa. Estos resultados refuerzan la idea de que los eventos ENOS al modificar las condiciones hidrometeorológicas del manglar, provocaran cambios apreciables en su vigorosidad, funcionamiento y extensión.

Al analizar la variación incremental en el tiempo de los valores NDVI del punto de muestreo 117, se observa que corresponde a un sector en proceso de acumulación sedimentaria litoral, que permitió la formación de nuevo terreno a partir de El Niño Costero de 2017, cuando el aumento de las precipitaciones incrementó los caudales de los ríos, y con ello la mayor llegada de sedimentos a su desembocadura. Posteriormente se inició un proceso de colonización vegetal que hacen que los valores NDVI se fueran incrementando progresivamente, que por su ubicación y valores que llega a registrar se asume corresponderían a bosques de mangle. Esta vegetación, por el importante incremento de valores NDVI, habría tenido un crecimiento sobresaliente a partir de febrero de 2023, mes en el que se inician las precipitaciones del ENOS fuerte, manteniendo valores altos, hasta marzo de 2024 (con ausencia del ENOS) donde el NDVI nuevamente desciende a los valores que presentaba antes de las lluvias.

En este sentido, como menciona Gitau et al., precipitaciones intensas y crecida de río a consecuencia del ENOS, favorecen al desarrollo de los manglares por la elevación de la superficie en la zona litoral y la reducción del estrés por salinidad [4]. Asimismo, como indica Alongi, hay

evidencia de las distintas etapas de cambios del manglar en relación con el balance entre la acumulación de sedimentos y el nivel del mar, porque al presentarse el ENOS en 2023, el suelo del manglar se elevó más rápido que el nivel del mar y progresivamente se desarrolló la vegetación hasta la colonización del manglar (por la acumulación de sedimentos en planicies y bancos intermareales). En cambio, al desaparecer estas condiciones, la erosión marina tiene tasas más altas que la acumulación de sedimentos, por lo que parte del manglar en sectores afectados se ahogará [2].

En el caso del punto de muestreo 105, la reducción progresiva de los valores NDVI, evidencia un proceso de deforestación de manglares, debido a la implementación de pozas camarónicas, que por las fechas en que se produjo (mediados de 2017), correspondería al periodo de reactivación económica tras El Niño Costero de 2017 planteada por el Gobierno del presidente Pedro Pablo Kuczynski [42].

La fuerte variabilidad del punto 146 se debería a su condición de bosque seco, presentando una relación más fuerte con las precipitaciones en el área de estudio, porque, por sus condiciones fenológicas adaptadas a climas con poca disponibilidad hídrica, tienen una baja densidad foliar en épocas de estiaje (NDVI bajo) y solo en los periodos de precipitaciones desarrollan más hojas para generar más fotosíntesis e impulsar su crecimiento y expansión (NDVI alto). Por ello, al aplicar correlaciones entre estas variables, se encontró el valor más alto ($r=0.692$; $p\text{-value}<0.001$) al contrastar el NDVI con la suma de las precipitaciones de los 3 meses anteriores. Resultado que se asocia al tiempo que requiere la planta para absorber esa humedad y desarrollar el nuevo follaje que pueda ser detectado por los sensores satelitales.

VI. CONCLUSIONES

La sostenibilidad y el vigor de los bosques de manglar de la región de Tumbes se han vinculado directamente en estos análisis con eventos ENOS durante 2015-2024, asociados principalmente a los cambios en las lluvias y el flujo base de meses previos de las zonas premontanas en la vertiente occidental de los Andes, presentando un ligero descenso debido a la tendencia negativa que tienen las precipitaciones en zonas más altas de la cuenca. Estos hallazgos concuerdan con otros estudios de manglares en las que las variaciones espaciales y temporales del crecimiento y producción forestal (reflejadas en el aumento del área forestal) están estrechamente entrelazadas con los cambios naturales y antropogénicos del clima.

Finalmente se destaca que la variación temporal del NDVI medio y el porcentaje de áreas sin cobertura vegetal, son buenos indicadores del estado de conservación de bosques y de procesos de cambio de uso del suelo que los afectan.

REFERENCIAS

[1] Y.-S. Wang and J.-D. Gu, "Ecological responses, adaptation and mechanisms of mangrove wetland ecosystem to global climate change and anthropogenic activities," *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 162, p. 105248, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.ibiod.2021.105248.

[2] D. M. Alongi, "The Impact of Climate Change on Mangrove Forests," *Mar.* 01, 2015, *Springer*. doi: 10.1007/s40641-015-0002-x.

[3] S. Luo and T. F. M. Chui, "Annual variations in regional mangrove cover in southern China and potential macro-climatic and hydrological indicators," *Ecol Indic*, vol. 110, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105927.

[4] P. N. Gitau, S. Duvail, and D. Verschuren, "Evaluating the combined impacts of hydrological change, coastal dynamics and human activity on mangrove cover and health in the Tana River delta, Kenya," *Reg Stud Mar Sci*, vol. 61, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.rsma.2023.102898.

[5] M. D. P. Godoy and L. D. de Lacerda, "Mangroves Response to Climate Change: A Review of Recent Findings on Mangrove Extension and Distribution," *An Acad Bras Cienc*, vol. 87, no. 2, pp. 651–667, May 2015, doi: 10.1590/0001-3765201520150055.

[6] N. Pécastaing, J. Cortez, and J. Salavarriga, "The effects of El Niño events on mangrove-dependent populations' income in Peru," *Ocean Coast Manag*, vol. 257, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2024.107322.

[7] V. C. E. Machava-António *et al.*, "Massive mangrove dieback due to extreme weather impact - case of Maputo River Estuary, Mozambique," *Reg Stud Mar Sci*, vol. 78, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.rsma.2024.103770.

[8] A. Baubekova, A. Ahrari, H. Etemadi, B. Klöve, and A. T. Haghghi, "Environmental flow assessment for intermittent rivers supporting the most poleward mangroves," *Science of the Total Environment*, vol. 907, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167981.

[9] K. Takahashi and A. Martínez, "El Niño, cambio climático, y el ecosistema de manglares de Tumbes," *Boletín Técnico: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño*, vol. 2, no. 7, pp. 5–8, Jul. 2015, Accessed: Feb. 15, 2025. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/4626>

[10] I. Pelckmans, J. P. Belliard, O. Gourgue, L. E. Dominguez-Granda, and S. Temmerman, "Mangroves as nature-based mitigation for ENSO-driven compound flood risks in a large river delta," *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 28, no. 6, pp. 1463–1476, Apr. 2024, doi: 10.5194/hess-28-1463-2024.

[11] S. B. Morera, T. Condom, A. Crave, P. Steer, and J. L. Guyot, "The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968-2012)," *Sci Rep*, vol. 7, no. 1, Dec. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-12220-x.

[12] K. Takahashi and J. Reupo, "Índice Costero El Niño (ICEN) con nueva fuente de datos," *Boletín técnico: Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, vol. 2, no. 6, pp. 9–10, Jun. 2015, Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5062>

[13] K. Takahashi, K. A. Mosquera Vásquez, and J. Reupo, "El Índice Costero El Niño (ICEN): historia y actualización," *Boletín técnico: Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, vol. 1, no. 2, pp. 8–9, Feb. 2014, Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/4639>

[14] D. A. Friess, M. F. Adame, J. B. Adams, and C. E. Lovelock, "Mangrove forests under climate change in a 2°C world," *WIREs Climate Change*, vol. 13, no. 4, Jul. 2022, doi: 10.1002/wcc.792.

[15] J. S. Moquet *et al.*, "Control of seasonal and inter-annual rainfall distribution on the Strontium-Neodymium isotopic compositions of suspended particulate matter and implications for tracing ENSO events in the Pacific coast (Tumbes basin, Peru)," *Glob Planet Change*, vol. 185, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.gloplacha.2019.103080.

[16] D. Flores, "Impactos de El Niño en el ecosistema del manglar de Tumbes - Perú," *Boletín técnico: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño*, vol. 4, pp. 4–7, Jul. 2017, Accessed: Nov. 16, 2024. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5106>

[17] R. A. Seminario-Córdova, I. B. Barreto, and Z. E. E. Tuesta, "Coastal wetlands of the north of Peru: preservation progress," *Acta Sci Biol Sci*, vol. 44, p. e62571, Oct. 2022, doi: 10.4025/actascibiolsci.v44i1.62571.

[18] L. D. Lacerda, J. E. Conde, B. Kjerfve, R. Alvarez-León, C. Alarcón, and J. Polanía, "American Mangroves," in *Mangrove Ecosystems*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002, pp. 1–62, doi: 10.1007/978-3-662-04713-2_1.

- [19] F. Mialhe, Y. Gunnell, and C. Mering, "The impacts of shrimp farming on land use, employment and migration in Tumbes, northern Peru," *Ocean Coast Manag.*, vol. 73, pp. 1–12, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2012.12.014.
- [20] Servicio Nacional de Áreas Protegidas por el Estado, "Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes," Jan. 2019.
- [21] K. Kanjin and B. M. Alam, "Assessing changes in land cover, NDVI, and LST in the Sundarbans mangrove forest in Bangladesh and India: A GIS and remote sensing approach," *Remote Sens Appl.*, vol. 36, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.rsase.2024.101289.
- [22] B. O'Connor *et al.*, "Earth observation as a tool for tracking progress towards the Aichi Biodiversity Targets," *Remote Sens Ecol Conserv.*, vol. 1, no. 1, pp. 19–28, 2015, doi: 10.1002/rse2.4.
- [23] H. Nagendra *et al.*, "Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats," *Ecol Indic.*, vol. 33, pp. 45–59, 2013, doi: 10.1016/j.ecolind.2012.09.014.
- [24] H. Zhang, J. Ma, C. Chen, and X. Tian, "NDVI-Net: A fusion network for generating high-resolution normalized difference vegetation index in remote sensing," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 168, pp. 182–196, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2020.08.010.
- [25] H. I. Carbajal-Morán and F. I. I. Onofre-Enriquez, "Determination with satellite images of the normalized difference vegetation index of the Pampas-Tayacaja valley," vol. 5, no. 1, pp. 228–245, 2020, doi: 10.23857/pc.v5i1.1893.
- [26] A. Pérez, D. Gutiérrez, M. S. Saldarriaga, and C. J. Sanders, "Hydrological controls on the biogeochemical dynamics in a Peruvian mangrove forest," *Hydrobiologia*, vol. 803, no. 1, pp. 69–86, Feb. 2017, doi: 10.1007/s10750-017-3118-2.
- [27] D. Flores, L. Céspedes Reyes, and A. Martínez Grimaldo, "Identificación de servicios ecosistémicos en el Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes," Dec. 2013. Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/477>
- [28] Ministerio del Ambiente, "Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú," May 2019. Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: <https://geoservidor.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/MEMORIA-DESCRIPTIVA-MAPA-DE-ECOSISTEMAS.pdf>
- [29] Ministerio del Ambiente, "Mapa Nacional de Cobertura Vegetal," Dec. 2015. Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: https://geoservidor.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/memoria_descriptiva_cobertura_vegetal.pdf
- [30] Autoridad Nacional del Agua, "Consejos de Recursos Hídricos de Cuenca Tumbes," 2019. Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.ana.gob.pe/2019/consejo-de-cuenca/tumbes/Hidrograf%C3%ADa>
- [31] Senamhi, "Modelamiento hidrológico del río Zaramilla," Nov. 2016.
- [32] Autoridad Nacional del Agua, "Diagnostico de cultura del agua cuenca río Tumbes," 2012.
- [33] Instituto Nacional de Recursos Naturales, "Estrategia de conservación del ecosistema de Los Manglares de Tumbes," 2001. Accessed: Nov. 16, 2024. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12543/2511>
- [34] Google, "NDVI, Mapping a Function over a Collection, Quality Mosaicking," Google Earth Engine Guides. Accessed: Jan. 13, 2025. [Online]. Available: Google Earth Engine Guides
- [35] Google, "Compositing and Mosaicking," Google Earth Engine Guides. Accessed: Jan. 13, 2025. [Online]. Available: https://developers.google.com/earth-engine/guides/ic_composite_mosaic
- [36] Instituto Geofísico del Perú, "Eventos El Niño y La Niña Costeros." Accessed: Feb. 13, 2025. [Online]. Available: http://met.igp.gob.pe/elnino/lista_eventos.html
- [37] University of Hawaii, "University of Hawaii Sea Level Center." Accessed: Feb. 07, 2025. [Online]. Available: <https://uhslc.soest.hawaii.edu/>
- [38] L. Ruan, M. Yan, L. Zhang, X. Fan, and H. Yang, "Spatial-temporal NDVI pattern of global mangroves: A growing trend during 2000–2018," *Science of The Total Environment*, vol. 844, p. 157075, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157075.
- [39] M. Daniela Durand Poma, J. Carlo Contreras Garces, D. Mirella Farromeque Pacifico, A. Soto Lopez, and U. Francisco Giraldo Malca, "Correlation of climate variation and NDVI values using Landsat scenes in the Amazonian penillanura of Yurimaguas - Peru, from 1984 to 2023," in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2024. doi: 10.18687/LACCEI2024.1.1.1811.
- [40] A. Jimena Yuijan Rodriguez Prieto, J. Fransheska Quispe Roldan, K. Ian Breytner Sanchez Rosales, X. Casasola Lescano, Y. Milen Sanjinez Viera, and U. Francisco Giraldo Malca, "Climate variation in the Amazonian peneplain due to deforestation and urban expansion in Iquitos - Peru, between 1984 and 2023," in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2024. doi: 10.18687/LACCEI2024.1.1.1828.
- [41] A. Pérez, D. Gutiérrez, M. S. Saldarriaga, and C. J. Sanders, "Hydrological controls on the biogeochemical dynamics in a Peruvian mangrove forest," *Hydrobiologia*, vol. 803, no. 1, pp. 69–86, Nov. 2017, doi: 10.1007/s10750-017-3118-2.
- [42] Decreto de Urgencia N.º 007-2017, "Decreto de Urgencia que establece medidas extraordinarias para la reactivación productiva agraria y pesquera," 2017. Accessed: Feb. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/mef/normas-legales/226766-007-2017>