

Spatio-Temporal Modeling and Projection of Changes in the Lucre-Huacarpay Wetland Against Land-Use Transformation and Climate Variability

Pedro Giancarlo Lavado Medina¹; Anahí Kiara Guerra Ñaupá² and Samuel Astete³

^{1,2,3}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u202010705@upc.edu.pe, u20211c356@upc.edu.pe, pcigsast@upc.edu.pe

Abstract– Abstract – *The Lucre-Huacarpay wetland, located in Cusco, is a representative case of the progressive threat faced by high-Andean wetlands due to land use and land cover transformation and the intensification of climate variability. This study analyzed the spatiotemporal changes of the wetland during the period 2000–2024, with projections for the years 2030 and 2050, with the aim of generating scientific evidence to contribute to its conservation. Landsat 5 and 8 satellite images were used, applying supervised classification using the Random Forest (RF) algorithm, complemented by spectral indices. An LSTM-type artificial neural network was used for the prediction model, along with input data on the area of the conserved and degraded wetland. The results show that the wetland lost 30.3% of its surface area during the study period, decreasing from 296.4 ha to 206.6 ha. Most of this reduction was due to the increase in degraded wetland, which represented water stress in various areas of the wetland. This category increased from 9.6 to 77.1 ha. The increase in pasture and cropland also contributed to the change. Projections indicate a reduction of conserved wetland to 176,54 ha in 2030 and 168,53 ha in 2050, considering conservation measures implemented in the final years of the analyzed period. These results indicate the need to strengthen land management, continuous monitoring through remote sensing, and integrated decision-making to ensure ecosystem conservation.*

Keywords- *Wetland, Land use and land cover change, Climate variability, Water stress.*

Modelado Espacio Temporal y Proyección de los Cambios en el Humedal Lucre-Huacarpay ante la Transformación de Uso de Suelo y Variabilidad Climática

Pedro Giancarlo Lavado Medina¹; Anahí Kiara Guerra Ñaupá² and Samuel Astete³

^{1,2,3}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u202010705@upc.edu.pe, u20211c356@upc.edu.pe, pcigsast@upc.edu.pe

Resumen – El humedal Lucre-Huacarpay, ubicado en Cusco, constituye un caso representativo de la amenaza progresiva que sufren los humedales altoandinos a causa de la transformación del uso y cobertura del suelo y la intensificación de la variabilidad climática. Este estudio analizó los cambios espacio-temporales del humedal durante el periodo 2000-2024 con una proyección para los años 2030 y 2050, con el objetivo de generar evidencia científica para contribuir a su conservación. Para ello, se emplearon imágenes satelitales Landsat 5 y 8, aplicando una clasificación supervisada mediante el algoritmo Random Forest (RF), complementada con índices espectrales. Para el modelo de predicción se utilizó una red neuronal artificial tipo LSTM y data de entrada del área del humedal conservado y deteriorado. Los resultados evidencian que el humedal perdió 30.3% de su superficie entre el periodo de estudio, reduciéndose de 296.4 ha a 206.6 ha. La mayor parte de esta reducción se debió al aumento del humedal deteriorado, el cual representó el estrés hídrico en diversas zonas del humedal, esta categoría pasó de 9,6 a 77.1 ha. El aumento de pastos y cultivos también contribuyó al cambio. Las proyecciones indican una reducción del humedal conservado hasta quedar en 176,54 ha en 2030 y 168,53 ha en 2050 considerando medidas de conservación implementadas en los últimos años del periodo analizado. Estos resultados indican la necesidad de fortalecer la gestión territorial, el monitoreo continuo mediante teledetección y la integración de la toma de decisiones con el fin de garantizar la conservación del ecosistema.

Palabras clave – Humedal, Cambio de uso y cobertura de suelo, Variabilidad climática, Estrés hídrico.

I. INTRODUCCIÓN

Los humedales son ecosistemas híbridos por la presencia de agua de forma permanente o intermitente que brindan servicios ecosistémicos fundamentales como provisión de agua, regulación hídrica y hábitat de biodiversidad [1]. A nivel mundial, más del 35% de los humedales han sido degradados o perdidos debido a actividades humanas y efecto del cambio climático, lo que conlleva a una pérdida progresiva de este ecosistema [2].

En particular, los humedales altoandinos, que son ecosistemas frágiles con un valor ambiental, cultural y económico para las comunidades dependientes de ella [3], están siendo amenazados por la transformación de su cobertura no planificada a causa antrópica y por alteraciones climáticas asociadas al cambio climático [4].

En América Latina y el Caribe, los humedales enfrentan vulnerabilidad creciente por la falta de monitoreo y de políticas efectivas para su protección [5]. En el contexto nacional, Perú cuenta con un marco normativo respecto a la protección de estos

ecosistemas como la Ley N° 32099 y el Decreto Supremo N° 006-2021-MINAM; sin embargo, la conservación de los humedales aún enfrenta grandes desafíos [6].

El humedal Lucre – Huacarpay, ubicado en el departamento de Cusco y designado como Sitio Ramsar desde el 2006 tras albergar una gran cantidad de especies de aves y ser una fuente hídrica y de forraje para las comunidades, ejemplifica esta problemática mediante actividades con una gestión desordenada como el sobrepastoreo, la agricultura intensiva, expansión urbana descontrolada y contaminación de aguas residuales lo que ha generado un deterioro evidente al humedal [7].

A todo ello se le suma el impacto de la variación climática por los cambios en los patrones de temperaturas y precipitaciones para los periodos de 1968 a 2012, conllevando la presencia de riesgo de sequía alto y muy alto en varias zonas del departamento de Cusco [8], siendo Lucre clasificado en riesgo alto [9]. En la actualidad, en Cusco continúa presentando riesgo de sequías extremas del tipo medio y alto con zonas de riesgo muy alto incluido el distrito de Lucre [10].

A pesar de lo anteriormente mencionado, el Humedal Lucre – Huacarpay cuenta con una limitada base de investigación científica destinada a evaluar y cuantificar los impactos de la pérdida territorial y el estado hídrico vegetativo derivados tanto por factores de origen antropogénicos como climáticos.

Es así como el objetivo del presente trabajo es determinar las alteraciones asociadas al cambio de uso y cobertura del suelo que afectaron el área del humedal Lucre - Huacarpay durante el periodo 2000–2024 y proyectar su evolución hacia los años 2030 y 2050. Estos resultados tienen propósito de aportar evidencia técnica para la formulación de estrategias ambientales sostenibles alineadas a su conservación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis de la dinámica de los humedales resulta fundamental para comprender las presiones a las que estos ecosistemas se enfrentan y los factores antrópicos o climáticos que condicionan su permanencia. Para evitar su deterioro se realizan estudios y monitoreos de las áreas de pérdida de los humedales ocasionadas por el cambio de uso de suelo como el caso de los humedales de Sylhet en Bangladesh [11] donde se obtuvo la pérdida por causas antrópicas o el caso de los humedales de Uchhali y Kjabeki ubicados en Pakistán, los

cuales adoptaron la implementación de medidas de conservación y manejo adecuado de los recursos del bioma, para contrarrestar los cambios en los patrones de uso de suelo [12]. Para esto, se requiere el uso de técnicas adecuadas con un procesamiento detallado de teledetección y proyección como detalla a continuación:

A. Área de estudio

El estudio se realizó a base del ámbito o delimitación del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay (Fig 1). Este se encuentra ubicado en Perú, exactamente, en el departamento de Cusco, provincia de Quispicanchi, distrito de Lucre con una altitud de 3,020 msnm y coordenadas geográficas 13°36’71” S 71°44’21” W. El humedal se encuentra en la ecorregión Puna Húmeda de los Andes Centrales y Yungas Peruanas con especies vegetales representativas del área como la totora (*Typha angustifolia*) que sirven como anidamiento y refugio de ornitofauna tanto nativa como migratoria [13]. El clima se encuentra separado en dos periodos, siendo estos la temporada de lluvia con presencia en los meses de noviembre a marzo y la temporada de secas entre los meses de abril a octubre. Presenta una temperatura media anual de 12.3 °C y una precipitación anual de 477.7 mm. El clima en general es seco y templado [13].

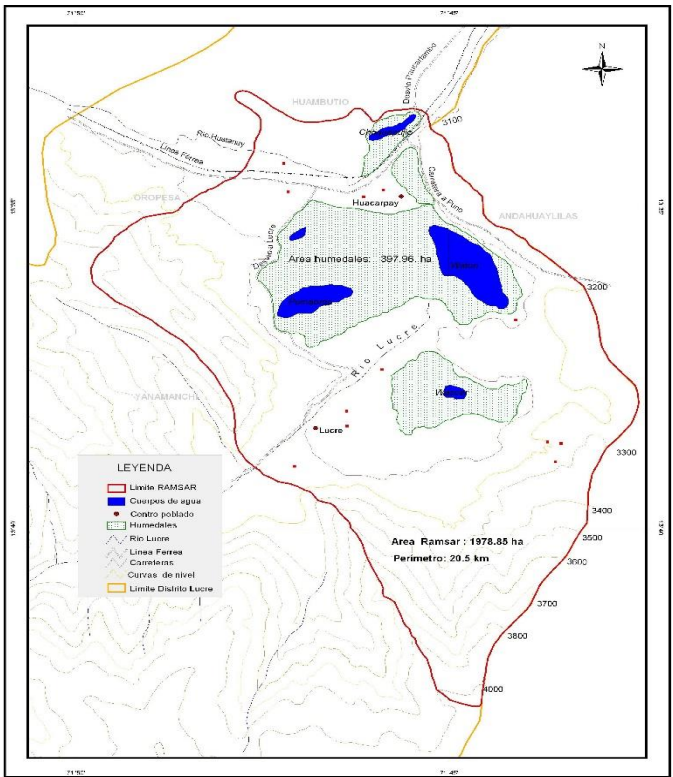


Fig. 1 Mapa base Humedal Lucre – Huacarpay

B. Descripción de los cambios de uso y cobertura de suelo en la zona de estudio.

La investigación se desarrolló con la consulta de estudios científicos en bases de datos como Web of Science, Scopus,

ScienceDirect y SciELO. Esta combinación de fuentes y técnicas permitió examinar la reducción del área del humedal.

El proceso inicia con la delimitación del área de estudio utilizando como base el mapa del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay (Sitio Ramsar N° 1627). Esto se realizó mediante la plataforma de ArcMap.

Posteriormente, se realiza la recopilación de datos geoespaciales mediante las imágenes satelitales Landsat [14], siendo los recomendados las versiones de Landsat 7 y 8 [15] por contener información satelital desde el año 1999. Sin embargo, la data obtenida de Landsat 7 presenta errores en las imágenes con pixeles vacíos desde 2003 [16]. Por esta razón, optamos por el uso de imágenes provenientes de Landsat 5 que abarca los años que Landsat 7 no pudo extraer de manera adecuada para el periodo del 2000 al 2011 [17], junto a las imágenes de Landsat 8 para el periodo del 2013 al 2024 [15]. El proceso de obtención de la data satelital puede ser dado mediante plataformas de acceso libre como el portal directo del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) [15]; sin embargo, al utilizar este medio se obtuvieron escenas completas de imágenes satelitales que toman un área mayor al del humedal delimitado. Por ello se escogió la plataforma de Google Earth Engine (GEE) ya que presenta la disponibilidad de datos los satélites Landsat, con el cual mediante la programación se realizó un recorte de acuerdo con la delimitación otorgada al área de estudio. La plataforma GEE ofrece imágenes previamente corregidas sin la necesidad de realizar manualmente la disminución de la nubosidad mediante softwares como ENVI 5.3 [18]. Dentro de su catálogo se escogieron los conjuntos de imágenes con reflectancia superficial ya que presentaban una corrección atmosférica. Para el objetivo de la investigación se requirió que las imágenes se encuentren dentro del periodo estacional seco, siendo este entre los meses de abril a octubre [13], tomando como base el mes de agosto al ser el que presenta mayor cantidad de imágenes para el periodo de estudio. Además, las imágenes satelitales debían presentar una nubosidad recomendable menor al 35% [19]. El material recolectado, sin contar los años 2002, 2005, 2012, 2017, 2021 y 2022 tras no cumplir con los criterios, sirvió como fuente básica de análisis para analizar el cambio de uso y cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay.

Por consiguiente, se realizan los trazos de geometría de entrenamiento que representarían diferentes tipos de cobertura, tomando como base la clasificación brindada por MapBiomas Perú, las cuales fueron ajustadas a la leyenda de Nivel I, Nivel II y Nivel III de Corine Land Cover adaptada para Perú [20] y adaptada para Colombia [21]. Las categorías de estudio son vistas en la Tabla I, siendo identificadas mediante campo, el uso de la fotointerpretación y de imágenes a alta resolución en Google Earth Pro, sirvieron para el análisis cuantitativo multitemporal en la presente zona.

TABLA I
Categorías de uso y cobertura de suelo del Sitio Ramsar Humedal Lucre - Huacarpay

Nombre de categoría	Descripción de categoría
Infraestructura	Espacios con presencia de edificaciones y los espacios adyacentes de la infraestructura, las cuales llegan a cubrir más del 80% de la superficie del terreno. Es decir, incluyen casas individuales con presencia de jardín y áreas verdes, áreas cubiertas por asfalto o cemento, áreas de recreación y servicios públicos como escuelas, mercados, parqueaderos, hoteles; entre otros [21].
Mosaico de pastos y cultivos	Territorios agrícolas presentes en el área de estudio, los cuales están comprendidas principalmente a áreas dedicadas a cultivos permanentes, transitorios y áreas agrícolas heterogéneas (mosaico de cultivos) con la presencia de áreas para el pastoreo ganadero cuya diferencia no es notable con las áreas agrícolas [21].
Cobertura vegetal	Los grupos de cobertura natural densa a los alrededores del humedal cuyo crecimiento se basa en crecimiento arbustivo y herbáceo sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales que no llega a tener mucha intervención antrópica [21].
Suelo desnudo	Superficies de terreno con escasa o nula vegetación. Esta característica puede deberse al estado natural de la zona (superficie montañosa) o como consecuencia de condiciones climáticas extremas y/o alteraciones antropogénicas [21].
Humedal	Superficies anegadizas, es decir terreno inundable con presencia de cuerpos de agua como lagunas permanentes, intermitente y estacionales, además de presencia de vegetación en la mayor parte del área [20].
Laguna	Los cuerpos de agua dentro del área del humedal que pueden ser del tipo estacional, intermitente o permanente [20].
Humedal deteriorado	Esta clasificación no se encuentra dentro de la leyenda del Corine Land Cover; sino fue establecida para estudiar la intensidad y tendencia de degradación en el humedal asociado a problemas como el estrés hídrico presente en el humedal ya que las sequías frecuentes presentan impacto en el patrón de crecimiento, distribución, estructura y sucesión de la vegetación del ecosistema [22].

Para verificar lo mencionado de la última categoría (Humedal deteriorado), se aplicó el índice Land Surface Water Index (LSWI) con el objetivo de evaluar el contenido de agua en la vegetación y suelos asociados a humedad en ecosistemas [23]. Para ello se establecieron puntos de referencia en las imágenes satelitales en áreas que, según la fotointerpretación, presentaban cambios en el humedal a lo largo del periodo de tiempo, comparándolas con áreas que no presentaban esos cambios. Se realizó un análisis del LSWI de todas las imágenes satelitales disponibles del área. Este análisis consistió en calcular el LSWI promedio de cada mes y de cada año disponible en una sección con cambio y en otra sin cambio.

Posteriormente se realizó la clasificación supervisada que fue aplicada en un entorno del algoritmo Random Forest dentro

de la plataforma de GEE como fue aplicado en el caso de estudio del humedal Bisalpur y la Reserva de Conservación de Bisalpur [24]. La clasificación con este algoritmo se basa en la cantidad de árboles de decisiones el cual puede variar como en el caso de análisis de los humedales interiores de la provincia de Kivu Sur donde se indicó como ideal la cantidad de 250 árboles de decisión [25], o como el caso de evaluación de humedales costeros en China obteniendo que tanto el algoritmo como la cantidad de 100 árboles son ideales al haber demostrado superioridad ante otros clasificadores digitales [26]. Siguiendo con el último caso, se optó por la cantidad de 100 para la clasificación de cambio de uso de suelo; además, tomando en consideración que no necesariamente el aumento de árboles de decisión influye en la mejora del porcentaje de precisión de la clasificación [27]. Además, se complementó el uso de índices espectrales como los índices de vegetación (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y Tasseled Cap Greenness (TCG)) [28; 29; 30], índices de presencia de agua (Normalized Difference Water Index (NDWI) y LSWI) [28; 29; 30; 31] e índices de suelos con infraestructuras (Normalized Difference Built-up Index (NDBI)) [32; 33; 18]; para una mayor distinción de las clases a evaluar. Estos fueron calculados de manera automática mediante un código de programación y se obtuvieron como resultado la clasificación de las coberturas escogidas para cada año estudiado.

Por último, se realiza la generalización de polígonos de clasificación, posterior al análisis del grado de Precisión Global (Overall Accuracy) y el Coeficiente Kappa en el programa de Quantum Geographic Information System (QGIS) con 50 puntos de muestra estratificada por clase [34]. Todo ello con el objetivo de conocer la transición de cambios de cobertura del año inicial y final del periodo de estudio.

C. Proyección de los cambios en el área conservada y degradada del humedal

En cuanto la proyección se utilizó mediante la herramienta de una Red Neuronal Artificial (Artificial neural network (ANN)). Estas son redes conectadas a nodos o unidades de procesamiento, en las cuales se le suministra datos y mediante una fase de entrenamiento se obtiene resultados de las tendencias del problema estudiado [35]. La construcción de la ANN, fue mediante las herramientas de Google Colab y Jupyter Lab programando con el lenguaje Python, de tal manera que permita pronosticar en una regresión la dinámica futura de los humedales altoandinos mediante el aprendizaje de patrones de cambio.

Se utilizaron datos como el área de humedal deteriorado y el área del humedal que se mantuvo conservado, tomando en cuenta los datos obtenidos desde 2000 a 2024. Posteriormente, se implementó una red neuronal artificial mixta que combina redes neuronales densas y redes recurrentes LSTM (Long short-term memory). Estas redes neuronales son comúnmente usadas en problemas de regresiones y permiten capturar la distribución y variabilidad de diferentes problemas de series de tiempo y

distribuciones espaciales como la evaluación en humedales altoandinos, sucesiones ecológicas y calidad de efluentes [36].

La estructura de la red artificial implementada tiene la estructura LSTM + Dense + Dense + Dense. La capa LSTM contó con 600 neuronas y una aleatoriedad de inferencias (Dropout) de 0.01, seguidamente dos capas densas de 100 y 600 neuronas con un Dropout de 0.01 y una capa de salida con dos neuronas densas que realizan la inferencia.

Como optimizador se consideró “adam”, este optimizador calcula la media móvil de los momentos de primer y segundo orden para adaptar la tasa de aprendizaje [37], mientras que la función de pérdida penaliza el error absoluto medio (MAE) con el objetivo de encontrar pesos que pronostiquen acertadamente el retroceso del humedal altoandino sano versus cobertura de humedal altoandino degradada.

III. RESULTADOS

El proceso demandó un esfuerzo constante que implicó la recopilación, procesamiento y análisis de información en un periodo de aproximadamente 4 meses. Asimismo, se requirió del conocimiento técnico en programación para la aplicación de técnicas de teledetección y un análisis de series temporales.

Para validar la fiabilidad del procesamiento, se llevó a cabo una evaluación de la exactitud temática mediante la matriz de confusión para cada serie temporal. Los resultados obtenidos demuestran una alta consistencia metodológica a lo largo del periodo analizado, con valores de Precisión Global (Overall Accuracy) que oscilan entre el 80,24% y el 87,04%. Asimismo, el Índice Kappa alcanzó niveles situados predominantemente entre 0,74 y 0,83, lo cual ratifica un nivel de concordancia calificado como sustancial y técnicamente aceptable para la interpretación de los cambios en la cobertura del suelo. Con ello, se obtienen los resultados posteriores:

En el sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay, se destacó que 1,645,3 ha o el 82,48% del área total no presentó cambios en el periodo de estudio. No obstante, la influencia antropogénica directa, realizó cambios en la distribución de cobertura en las categorías de infraestructura con un aumento de 29,6 ha y el incremento de mosaico de pastos y cultivos en 93,4 ha desde el 2000 al 2024.

En cuanto al humedal, se obtuvo que este abarcaba 296,4 ha del área de estudio en el año 2000, representando un 14,86% de superficie de las 1994,7 ha totales. Asimismo, la categoría de humedal deteriorado abarcó 9,6 ha lo cual representa un 0,48% del área total de estudio. Por otro lado, para el año 2024 se obtuvo que el humedal disminuyó a 206,6 ha, representando un 10,36 %.

La categoría de humedal deteriorado incrementó a 77,1 ha lo cual representa un 3,86 % del área total. Para las categorías de suelo desnudo, laguna y cobertura vegetal se obtuvieron incrementos de 14 ha, un incremento de 0.5 ha y una reducción de 115 ha respectivamente. Dichos cambios se observan gráficamente en los mapas temáticos de la figura 2.

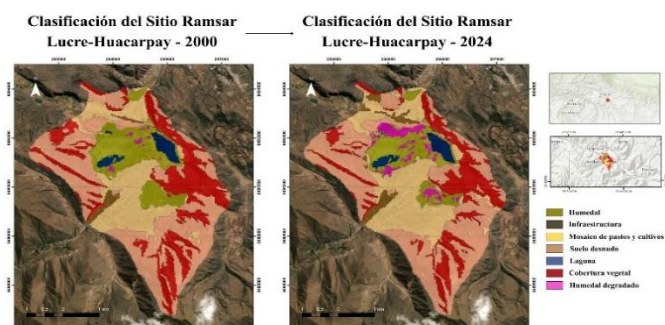


Fig. 2 Clasificación del Sitio Ramsar Humedal Lucre – Huacarpay 2000-2024

Detallando los cambios específicos de nuestra unidad de análisis, es decir del humedal como se observa en la figura 3, se identificó que el área que no presentó cambios es un aproximado de 200,2 ha, representado en un 55,67% del área total entre el periodo del 2000 al 2024. Además, el humedal presentó ganancia debido a la transición de suelo desnudo a humedal (1,47 ha) en la zona del borde superior del humedal central, el cambio de mosaico de pastos y cultivos a humedal (0,92 ha), de laguna a humedal (1,04 ha) y de humedal deteriorado a humedal (2,97 ha); todos estos están relacionados a las condiciones hidrológicas favorables que ayudan con la circulación del flujo hídrico y a la restauración del crecimiento vegetativo del humedal de especies resilientes como las gramíneas [13]. Lo anterior mencionado se presenta en la parte central del humedal debido a que es menos accesible y por ende cuenta con menor intervención humana directa, permitiéndole una mayor capacidad de resiliencia.

El humedal presentó una pérdida neta de 89,75 ha o del 30,3% debido principalmente a la transición de humedal a humedal deteriorado (68,03 ha) lo cual indica que el humedal se encuentra en estrés hídrico, es decir, ha estado perdiendo agua en el periodo de tiempo, por factores climáticos o antropogénicos. Así también, el humedal tuvo cambio de cobertura a mosaico de pastos y cultivos (22,01 ha) por medio de la desecación o drenaje de la superficie del humedal para ampliar la frontera agrícola [13]. En cuanto a la transición de humedal a suelo desnudo (3,76 ha), esta se presentó en mayor magnitud en áreas ubicadas en los márgenes del humedal por la construcción de carreteras o drenaje del humedal para actividades agropecuarias. Por otro lado, también se identificó un cambio de la cobertura de humedal a laguna (2,35 ha), esto debido a la presencia de una laguna estacional que toma parte de la cobertura vegetal o por la pérdida de la especie palustre predominante en el área que sería la totora la cual se encarga de la evapotranspiración y retención de agua, lo cual permitiría que el agua se estanque más y no se filtre ocasionando el aumento del espejo del agua [38].

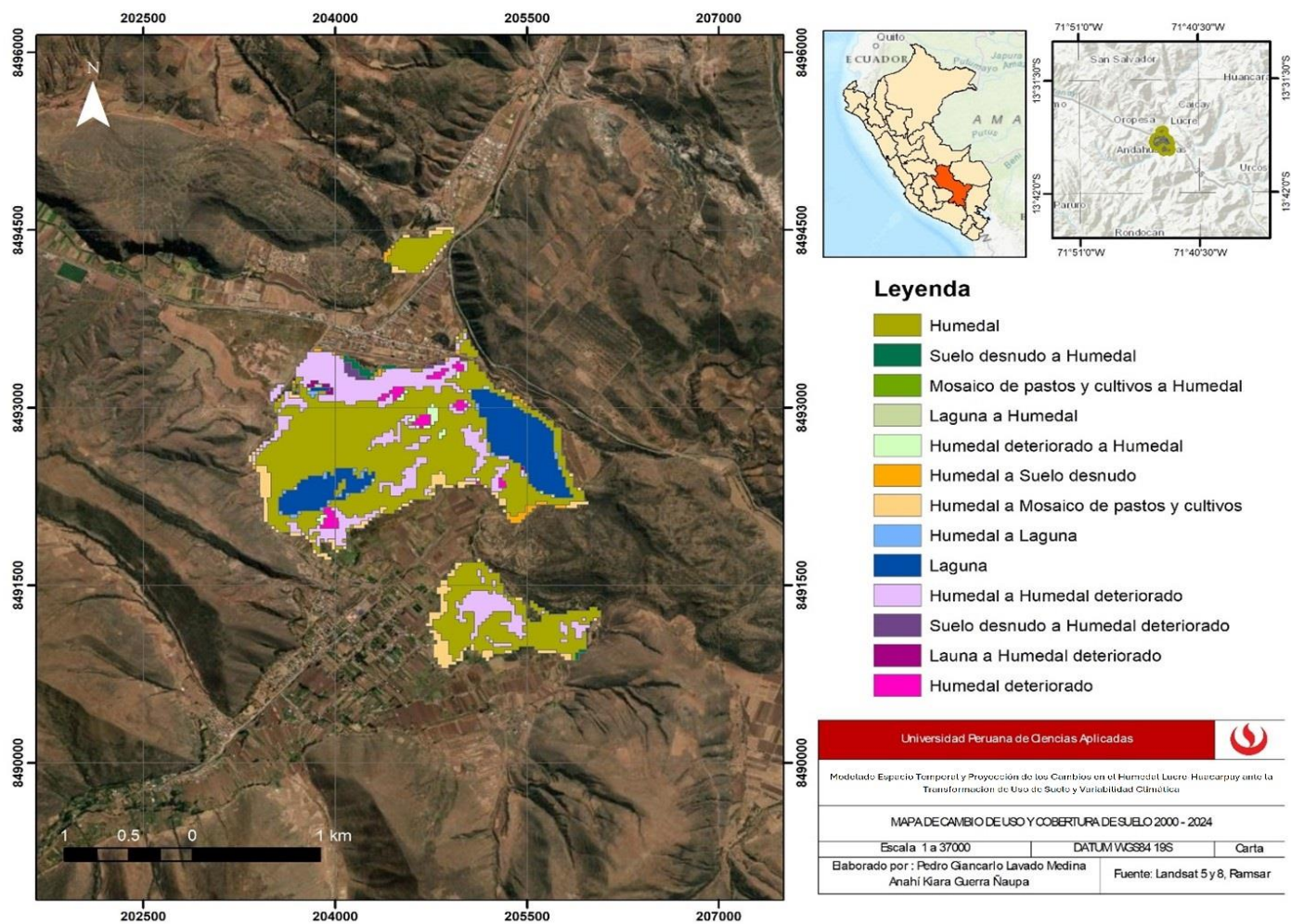


Fig.3 Mapa de cambio de uso y cobertura de suelo del Humedal Lucre – Huacarpay 2000 – 2024

Los tres humedales se ven afectados en los bordes provocado por actividades humanas como la agricultura y ganadería. Sin embargo, en el humedal central, este presenta en gran medida el deterioro junto a cambios en los bordes debido a los mosaicos de pastos y cultivos los cuales llegan a alterar el flujo hídrico en el área. Mientras que el humedal inferior derecho presenta esta degradación en la parte central debido al estrés hídrico provocado por factores climáticos o antropogénico intensificado por la compactación del suelo tras dar acceso a los animales ganaderos en estas zonas para su alimento; asimismo presenta la categoría de mosaicos de pastos y cultivos en los bordes que pueden alterar el recurso hídrico.

En cuanto el análisis específico complementario de la tendencia del humedal degradado y el humedal (conservado) para todo el periodo de estudio. El humedal conservado presentó una tendencia de reducción desde el año 2000 hasta el 2024 como se observa en la figura 4. Esto se evidencia estadísticamente con un coeficiente de cambio de -4.645 ha por año y una tendencia decreciente.

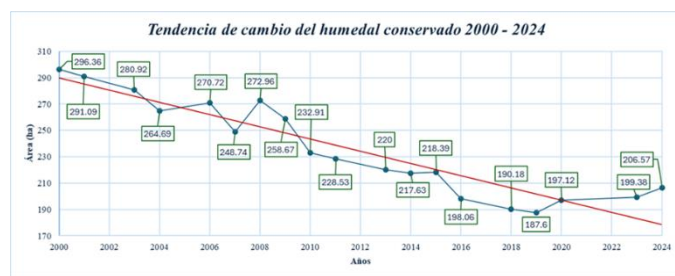


Fig.4 Tendencia de cambio del humedal (conservado) en el periodo 2000-2024

De igual manera, el humedal deteriorado siguió patrones similares al conservado con la diferencia de que este presentó una tendencia de aumento en las épocas que el conservado se reduce, y en reducción en las épocas que el conservado aumenta como se observa en la figura 5. Esto se evidencia estadísticamente con un coeficiente de cambio de 3.724 ha por año y una tendencia creciente.

IV. DISCUSIÓN



Fig.5 Tendencia de cambio del humedal deteriorado en el periodo 2000-2024

Sin embargo, para ambas coberturas, a partir del año 2019 esta tendencia empezó a revertirse hasta el año 2024, lo cual está relacionado a la delimitación de la faja marginal junto a la formulación de un proyecto de recuperación del humedal Lucre – Huacarpay [39].

En cuanto a la proyección de estos cambios, tal como nos presentan la Fig.6 donde se evalúa la tendencia respecto a las clases humedal deteriorado versus el humedal (conservado), ambas líneas siguen una tendencia inversamente proporcional donde las zonas degradadas le quitan espacios al humedal conservado, la aplicación del modelo de inteligencia artificial (IA) permitió estimar que, si bien las curvas de pérdida y ganancia nunca se interceptan, la disminución del humedal continúa para años posteriores.

Se proyectó que la cobertura de humedal altoandino conservado (sano) decrecerá hasta las 176,54 hectáreas para el año 2030; mientras que para el año 2050 este disminuye hasta 168,53 hectáreas, representando un escenario donde se mantienen las medidas de conservación ya implementadas.

Por lo contrario, el humedal degradado presenta un aumento equivalente, alcanzando hasta los 116,43 ha para el 2030 y 129,72 ha para el 2050, reflejando el incremento del impacto por fuente antrópica y variación climática.

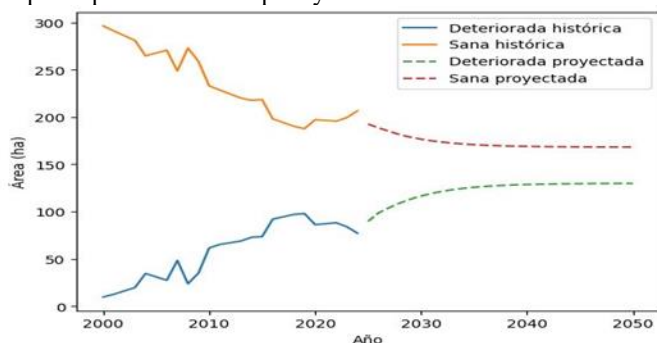


Fig.6 Proyección del área conservada y degradada

La estimación realizada tiene un error medio absoluto de 12,8 ha lo que significa que presenta un error relativo del 5 al 6%. Además, esta estimación puede mejorar al incluir variables meteorológicas que permitan una mejor cuantificación de la variabilidad espacial futura.

El humedal Lucre – Huacarpay constituye un caso de estudio relevante, ya que refleja de manera evidente las tendencias de pérdida y deterioro que caracterizan a este tipo de ecosistema a nivel regional y global. Dicho humedal presentó una pérdida del 27,36% de su cobertura. Este comportamiento está relacionado a factores locales como el cambio de uso y cobertura de suelo que genera pérdida en la extensión o afecta la condición del ecosistema haciéndolo más vulnerable [40]. La pérdida de la cobertura de suelo propia de un humedal, en su mayoría a causa antrópica, es aproximadamente de 0,85% a 1,6% por año [41], por lo que en un periodo de 21 años este equivaldría a una pérdida aproximada del 17,85% a 33,6% de pérdida del total como el caso del humedal El Relicto de la Chira que presentó una pérdida del 55,30% de su vegetación densa a causa antrópica [40] o como en el caso de los humedales del río Muga, cuya pérdida de cobertura de humedal fue provocada en su mayoría por factores antrópicos, representando una pérdida del 89,51% a causa de tierras de pastos y cultivos [42]. Sin embargo, en cuanto al resultado obtenido en el periodo de estudio, un valor de 6,12% o 22,01 hectáreas de pérdida se vio representada a causa de la expansión de pastos y cultivos, donde se demuestra que este no supera el rango mínimo mencionado por el RAMSAR. Este valor atípico se debe a los seguimientos realizados por el RAMSAR, donde se limita la expansión agrícola para amparar la conservación de este tipo de ecosistemas a través de la Ley General de Aguas promulgada por Decreto Ley No. 17752 [11][13]. Por lo tanto, se puede deducir que la pérdida del humedal analizado no está representada principalmente por la reducción de su extensión hacia una transición de coberturas de influencia humana; sino está mayormente asociado a impactos relacionados con una reducción espacial interno del humedal a causa del deterioro de la salud vegetativa, posiblemente por la alteración significativa en patrones climáticos que afecta la disponibilidad de agua [43]. La cobertura vegetal puede transicionar de vigorosa a no vigorosa a lo largo de los años en épocas de sequía [44]. Además, se evidencia en la alteración de los Humedales de Importancia Internacional con presencia de pérdida neta de superficie a consecuencia de la desecación [45], y sus múltiples impactos sobre la biodiversidad y servicios ecosistémicos [46]. En el caso del humedal Lucre - Huacarpay, este se encuentra en una zona que presenta riesgo de sequía extrema del tipo medio y alto [10] lo cual podría ser la causa principal del deterioro vegetativo. En el presente estudio, en el que se consideró evaluar la presencia de agua tanto en el suelo como en la vegetación del humedal mediante el uso del Índice de Humedad a nivel de Superficie (LSWI), se demostró el deterioro del humedal por estrés hídrico cuya área afectada fue incrementando durante el periodo de estudio, logrando alcanzar un 19,60%, 70,46 hectáreas, del humedal para el año 2024.

Es así como se proyecta que el área del humedal se perderá llegando a tener un área de 176,54 ha y 168,53 ha. para los años 2030 y 2050 respectivamente, tomando en consideración los impactos que trae la inadecuada gestión de actividad humana

junto a la variación climática. Este caso es similar a como lo ocurrido en el humedal Jingxin de China, en el cual la proyección de su humedal se perdió en gran medida por causas de actividades humanas y cambio climático que vulneran a su conservación [47]. De igual forma al caso de los humedales de RAJUK donde se analizó la disminución en la extensión del humedal de 1995 al 2022, proyectándolo hacia el año 2030 con una pérdida del 35% para los humedales temporales y un 36% para los humedales permanentes [48]. Por esta razón, las autoridades pertinentes deberían utilizar la información resultante de este proyecto de investigación para tomar medidas que eviten la pérdida total de un ecosistema de tanto valor como lo es el Humedal Lucre – Huacarpay.

No obstante, es preciso reconocer que una limitación intrínseca del modelo predictivo implementado radica en el uso exclusivo de los registros históricos de entrenamiento, asumiendo la estacionariedad de las relaciones hidrológicas; sin embargo, se plantea reducir esta limitación incorporando el contexto del cambio climático, dado que este ya está afectando múltiples extremos climáticos, como precipitaciones intensas y sequías, y se proyecta que el calentamiento global continúe intensificando el ciclo hidrológico [49]; bajo este enfoque, la variabilidad climática puede integrarse de forma implícita o complementaria a través de datos históricos y proyecciones, permitiendo que las relaciones aprendidas por la red LSTM no solo reflejen patrones pasados de variables como precipitación y temperatura, sino que también consideren posibles cambios en sus distribuciones futuras.

Frente a esta limitación del uso exclusivo de datos históricos, una mejora relevante consiste en la incorporación de variables forzantes climáticas provenientes de modelos de circulación general, constituyendo a un marco experimental coordinado que organiza simulaciones del sistema climático global mediante múltiples modelos, con el objetivo de analizar su respuesta bajo distintos escenarios bajo diferentes trayectorias de emisiones [50]. Esto proporciona información climática futura que difiere de la simple extrapolación de registros históricos, al incorporar posibles cambios en la dinámica del sistema climático. En este sentido, la integración de este tipo de salidas climáticas como variables de entrada en enfoques de modelación basados en datos permitiría complementar la información observada con escenarios futuros simulados, mejorando la capacidad de representación de condiciones hidrológicas no estacionarias y reduciendo la incertidumbre asociada a la proyección hacia horizontes temporales como el año 2050.

V. CONCLUSIÓN

El presente estudio evidenció que la principal causa del deterioro del humedal Lucre–Huacarpay no está asociada predominantemente a la pérdida directa de superficie por cambio de uso del suelo, sino al incremento progresivo del estrés hídrico que afecta la condición vegetativa y funcional del ecosistema. La transición interna de áreas de humedal hacia

estados degradados refleja una alteración significativa en la disponibilidad de agua, estrechamente vinculada a la variabilidad climática y a la recurrencia de periodos de sequía en la zona de estudio.

Entre los años 2000 y 2024, el humedal conservado se redujo mientras que el humedal deteriorado aumentó, indicando una degradación interna acelerada del ecosistema, a pesar de que el 82.48% del área total no presentó cambios en su cobertura. Estos resultados confirman que la pérdida de funcionalidad ecológica del humedal responde principalmente a procesos hidrológicos internos asociados al déficit hídrico persistente, más que a una conversión extensiva del uso del suelo.

Las proyecciones realizadas indican que, aun considerando la implementación de medidas de conservación durante los últimos años del periodo analizado, el humedal conservado continuará disminuyendo, lo que refuerza la tendencia de degradación asociada al estrés hídrico. En este contexto, los resultados contribuyen a la comprensión de la dinámica de humedales altoandinos frente a la variabilidad climática y resaltan la necesidad de fortalecer estrategias de gestión orientadas a la regulación del recurso hídrico, el monitoreo continuo mediante teledetección y la incorporación de modelos predictivos, con el fin de preservar los servicios ecosistémicos y la resiliencia ambiental del humedal Lucre–Huacarpay

VI. AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la iniciativa MapBiomias Perú por poner a disposición información geoespacial y clasificaciones de uso y cobertura de suelo de acceso abierto, las cuales fueron empleadas como referencia metodológica para el entrenamiento de clasificación del área de estudio.

REFERENCIAS

- [1] H. López y W. Cetzal, “Los humedales y su flora, una interacción de importancia para la conservación de la avifauna,”. Desde El Herbario CICY, 16, pp. 17–23, 2024. https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2024/2024-02-01-HLopez-Los-humedales-y-su-flora-una-interaccion-de-importancia-para-la-conservacion-de-la-avifauna.pdf
- [2] RAMSAR, “Perspectiva mundial sobre los humedales,” 2021. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/gwo_2021_s.pdf
- [3] Wetlands International, “Los humedales altoandinos como patrimonio,” 2019. <https://weadapt.org/wp-content/uploads/2023/05/programa-conservando-los-humedales-altoandinos2019-.pdf>
- [4] B. Li, R. Wan, G. Yang, S. Yang, L. Dong, J. Cui, y T. Zhang, “Centennial loss of lake wetlands in the Yangtze Plain, China: Impacts of land use changes accompanied by hydrological connectivity loss,” *Water Research*, 256, 121578, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121578>
- [5] H. Aponte, S. Gonzales y A. Gomez “Drivers of change in the wetlands of Latin America: The case of the coastal wetlands of Lima,” *South Sustainability*, e023, 2020, <https://doi.org/10.21142/SS-0102-2020-023>.
- [6] El Peruano, “Ley N° 32099 para la protección de humedales,” 2024. <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/2308799-4>
- [7] Y. Acostupa, D. Aréstegui, E. Castro, W. Choquevilca, G. Guzmán, y P. Sánchez, “Aplicación de la metodología FPEIR al diagnóstico ambiental del Humedal Lucre–Huacarpay, 2017,” *Yachay*, vol. 6, n.º 01, pp. 90–114, 2018. <https://doi.org/10.36881/yachay.v6i01.33>

- [8] Senamhi, "Impacto del cambio climático en cultivos anuales de las regiones de Cusco y Apurímac", 2012. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-apurimac/archivos/public/docs/1481.pdf>
- [9] Senamhi. "Análisis del riesgo de sequías en el sur del Perú," 2016. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/9934>
- [10] CENEPRED, "Mapas de riesgo por sequía en Cusco," 2023. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/16597>
- [11] M. Waleed, M. Sajjad, M. S. Shazil, S. Tariq y Md T. Alam, "Machine learning-based spatial-temporal assessment and change transition analysis of wetlands: An application of Google Earth Engine in Sylhet, Bangladesh (1985–2022)". *Ecological Informatics*, 75, 102075, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102075>
- [12] R. W. Aslam, H. Shu, A. Tariq, I. Naz, M. N. Ahmad, A. Qudsoos, K. Javid, F. Mustafa y H. Aeman, "Monitoring landuse change in Uchhali and Khabeki wetland lakes, Pakistan using remote sensing data", *Gondwana Research*, 129, 252–267, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.12.015>
- [13] RAMSAR. "Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR)," 2006. <https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/PE1627RIS.pdf>
- [14] Q. Demarquet S. Rapinel, O. Gore, S. Dufour y L. Hubert-Moy, "Continuous change detection outperforms traditional post-classification change detection for long-term monitoring of wetlands", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 133, 104142, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104142>
- [15] M. Seyam, M. Haque y M. Rahman, "Identifying the land use land cover (LULC) changes using remote sensing and GIS approach: A case study at Bhaluka in Mymensingh, Bangladesh," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7, 100293, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.csee.2022.100293>
- [16] M. Hemati, M. Hasanlou, M. Mahdianpari, y F. Mohammadimanes, "A Systematic Review of Landsat Data for Change Detection Applications: 50 Years of Monitoring the Earth", *Remote Sensing*, 13(15), 2869, 2021, <https://doi.org/10.3390/rs13152869>
- [17] Y. Quash, A. Kross y J. Jaeger "Assessing the impact of gold mining on forest cover in the Surinamese Amazon from 1997 to 2019: A semi-automated satellite-based approach," *Ecological Informatics*, 80, 102442, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102442>
- [18] M. Farhan, T. Wu, M. Amin, A. Tariq, R. Guluzade y H. Alzahrani, "Monitoring and prediction of the LULC change dynamics using time series remote sensing data with Google Earth Engine," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 136, 103689, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103689>
- [19] USGS, "Landsat 8 Cloud Cover Assessment Validation Data". <https://landsat.usgs.gov/landsat-8-cloud-cover-assessment-validation-data>
- [20] MINAM, "Análisis de las Dinámicas de Cambio de Cobertura de la Tierra en la Cobertura Andina", 2014. https://www.academia.edu/10363742/Informe_Final_del_Proyecto_An%C3%A1lisis_de_las_Din%C3%A1micas_de_Cambio_de_Cobertura_de_la_Tierra_en_la_Comunidad_Andina
- [21] IDEAM, "LEYENDA NACIONAL DE COBERTURAS DE LA TIERRA", 2010. <https://www.purace-cauca.gov.co/MiMunicipio/DocumentosGestinRiesgoYDesastres/Estudios%20gesti%C3%B3n%20del%20riesgo%20Purac%C3%A9/Leyenda%20nacional%20coberturas%20tierra.pdf>
- [22] X. Li, Y. Lin, X. Ye, C. Yuan, Z. Tan, y T. Sum, "The impacts of drought on the ecological niches of typical wetland plants in Poyang Lake, China" *Hydrology Research*, 55(9), 890–904, <https://doi.org/10.2166/nh.2024.033>
- [23] J. Aponte-Saravia y J. Ospina-Noreña, "Evaluando el desempeño de índices espectrales para identificar humedales alto andinos," *2 Revista de Teledetección*, 53, 59, 2019, <https://doi.org/10.4995/raet.2019.10580>
- [24] R. Singh, V. Saritha, y C. B. Pande, "Dynamics of LULC changes, LST, vegetation health and climate interactions in Wetland buffer zone: A remote sensing perspective", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 135, 103660, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103660>
- [25] C. B. Géant, M. N. Gustave, y S. Schmitz, "Mapping small inland wetlands in the South-Kivu province by integrating optical and SAR data with statistical models for accurate distribution assessment", *Scientific Reports*, 13(1), 17626, 2023, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43292-7>
- [26] X. Wang, X. Gao, Y. Zhang, X. Fei, Z. Chen, J. Wang, Y. Zhang, X. Lu, y H. Zhao, "Land-Cover Classification of Coastal Wetlands Using the RF Algorithm for Worldview-2 and Landsat 8 Images", *Remote Sensing*, 11(16), 1927, 2019, <https://doi.org/10.3390/rs11161927>
- [27] P. Probst, y A. L. Boulesteix, "To tune or not to tune the number of trees in random forest?", *Journal of Machine Learning Research*, 18, pp 1-18, 2018. <https://jmlr.org/papers/volume18/17-269/17-269.pdf>
- [28] R. Wang, J. Ding, X. Ge, J. Wang, S. Qin, J. Tan, L. Han y Z. Zhang, "Impacts of climate change on the wetlands in the arid region of Northwestern China over the past 2 decades," *Ecological Indicators*, 149, 110168, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110168>
- [29] C. Hidalgo-Corrotea, A. Alaniz, P. Vergara, D. Moreira-Arce, M. Carvajal, P. Pacheco-Cacino y A. Espinosa, "High vulnerability of coastal wetlands in Chile at multiple scales derived from climate change, urbanization, and exotic forest plantations," *Science of The Total Environment*, 903, 166130, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166130>
- [30] M. Fu, Y. Zheng, C. Qian, Q. He, Y. He, C. Wei, K. Yang, y W. Zhao, "Spatiotemporal evolution and driving mechanism of Dongting Lake based on 2005–2020 multi-source remote sensing data," *Ecological Informatics*, 83, 102822, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102822>
- [31] Z. Zhang, B. Hu, W. Jiang y H. Qiu, "Identification and scenario prediction of degree of wetland damage in Guangxi based on the CA-Markov model," *Ecological Indicators*, 127, 107764, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107764>
- [32] M. Assiri, M. Ali, M. Siddiqui, A. AlZahrani, L. Alamri, A. Alqahtani y A. Ghulam, "Remote Sensing Assessment of Water Resources, Vegetation, and Land Surface Temperature in Eastern Saudi Arabia: Identification, Variability, and Trends," *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 36, 101296, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101296>. *Big Data Research*, 35, 100416, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2023.100416>
- [33] R. Aslam, H. Shu, K. Javid, S. Pervaiz, F. Mustafa, D. Raza, B. Ahmed, A. Qudsoos, S. Al-Ahmadi y W. Hatamleh, "Wetland identification through remote sensing: Insights into wetness, greenness, turbidity, temperature, and changing landscapes," *Big Data Research*, 35, 100416, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2023.100416>
- [34] C. Laar, K. Annan, A. Gibrilla, Z. Kusi-Afrakoma, O. Korkor-Asante, M. Saah-Hayford, C. Egbi, D. Abdul-Wahab, J. Attah, y G. Anornu, "Assessing the impact of land use and land cover change on the Densu Delta wetland using Markov chain modeling and artificial neural networks," *Environmental Challenges*, 17, 101018, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101018>
- [35] Y. Quash, A. Kross, y J. A. G. Jaeger, "Assessing the impact of gold mining on forest cover in the Surinamese Amazon from 1997 to 2019: A semi-automated satellite-based approach," *Ecological Informatics*, 80, 102442, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102442>
- [36] X-H. Le, H.V. Ho, G. Lee y S. Jung, "Application of Long Short-Term Memory (LSTM) Neural Network for Flood Forecasting." *Water*. 2019; 11(7):1387. <https://doi.org/10.3390/w11071387>
- [37] P. Diederik y B. Jimmy, "Adam: A Method for Stochastic Optimization." *CoRR* abs/1412.6980, 2014. <https://arxiv.org/abs/1412.6980>
- [38] A. A. Rashed, "Assessment of aquatic plants evapotranspiration for secondary agriculture drains (case study: Edfina drain, Egypt)," *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 40(2), 117–124, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2014.07.001>
- [39] ANA, "RESOLUCIÓN DIRECTORAL Nro.196 -2020-ANA-AAA.UV", 2020. <https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/58-RD-0196-2020-08.pdf>
- [40] Z. M. Sanchez, L. Millones, y J. Ordoñez, "Evaluación del cambio de uso de suelo en un humedal relicto de la costa peruana," *South Sustainability*, 1–6, 2021, doi: <https://doi.org/10.21142/SS-0201-2021-e027>
- [41] RAMSAR, "PERSPECTIVA MUNDIAL SOBRE LOS HUMEDALES," 2018. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/gwo_s.pdf
- [42] K. G. Belachew, A. A. Gedefaw, y B. T. Beyene, "Wetland transformations, underlying drivers, and mitigation solutions using geospatial technologies in the Muga watershed, upper Abay basin,

- Northeastern Ethiopia”, *Discover Applied Sciences*, 7(10), 1123, 2025
<https://doi.org/10.1007/s42452-025-06684-0>
- [43] Gobierno de Chile, "CONCEPTOS Y CRITERIOS PARA LA EVALUCION AMBIENTAL DE HUMEDALES," 2006.
<https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/GUIAV67JUNIO2007.pdf>
- [44] G. Silva, “Vigor de la hierba pepinillo en un pantano salado de California: un estudio de teledetección”, Universidad Estatal de California, 2019.
- [45] Y. Xi, S. Peng, P. Ciaes, y Y. Chen, “Future impacts of climate change on inland Ramsar wetlands”, *Nature Climate Change*, 11(1), 45–51, 2021,
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-00942-2>
- [46] P. A. Harrison, P. M. Berry, G. Simpson, J. R. Haslett, M. Blicharska, M. Bucur, R. Dunford, B. Egoh, M. Garcia-Llorente, N. Geamănă, W. Geertsema, E. Lommelen, L. Meiresonne, y F. Turkelboom, “Linkages between biodiversity attributes and ecosystem services: A systematic review”, *Ecosystem Services*, 9, 191–203, 2014,
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.05.006>
- [47] X. Xing, Y. Liu, R. Jin, P. Zhang, S. Tong, y W. Zhu, “Major Role of Natural Wetland Loss in the Decline of Wetland Habitat Quality—Spatio-Temporal Monitoring and Predictive Analysis,” *Sustainability*, 15(16), 12415, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su151612415>
- [48] M. F. Khan, M. R. Islam y M. A. Chowdhury, “Spatio-temporal assessment and prediction of wetlands: Past, present and future scenario in RAJUK DAP area using Artificial Neural Network and Geospatial Techniques”, *Neural Network and Geospatial Techniques*, *Heliyon*, 10(14), 2024. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e34327
- [49] IPCC, “Summary for Policymakers,” in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf
- [50] J. Peng, A. Loew, S. Merlin, and N. J. Verhoest, “A review of spatial downscaling of satellite-derived soil moisture,” *Geoscientific Model Development*, vol. 9, no. 5, pp. 1937–1962, 2016.
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>