

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA
(NDVI) PARA LA DETECCIÓN, ANÁLISIS Y MONITOREO DE LA
RECUPERACIÓN DE ÁREAS DE TOTORA AFECTADAS POR INCENDIOS EN
LA RESERVA NACIONAL DEL TITICACA – 2023**

PRESENTADA POR:

BRANDON VLADIMIR VARGAS CHUQUIMIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

PUNO – PERÚ

2026



Repositorio Institucional ALCIRA by Universidad Privada San Carlos is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



5.39%

SIMILARITY OVERALL

SCANNED ON: 20 MAY 2026, 11:26 AM

Originality & Authorship Report

Your text is highlighted according to the matched content in the results above.

● IDENTICAL
0.97%

● CHANGED TEXT
4.42%

Report #33248255

BRANDON VLADIMIR VARGAS CHUQUIMIA // APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) PARA LA DETECCIÓN, ANÁLISIS Y MONITOREO DE LA RECUPERACIÓN DE ÁREAS DE TOTORA AFECTADAS POR INCENDIOS EN LA RESERVA NACIONAL DEL TITICACA – 2023 RESUMEN L

a presente investigación tuvo como objetivo evaluar la variación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca, mediante un análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat, considerando un mes previo y doce meses posteriores a la ocurrencia de incendios antrópicos registrados durante el año 2023. **1** El estudio adoptó un enfoque

cuantitativo de tipo aplicado, con diseño no experimental longitudinal, integrando técnicas de teledetección y análisis geoespacial para el cálculo y procesamiento del índice. Se delimitaron y compararon áreas afectadas por incendios con zonas de referencia no perturbadas, aplicando análisis estadísticos para determinar diferencias significativas en los valores del NDVI a lo largo del periodo evaluado. Los resultados evidenciaron una disminución significativa del índice inmediatamente después del evento de incendio, seguida de una recuperación progresiva de la cobertura vegetal durante los meses posteriores; sin embargo, los valores previos al disturbio no fueron alcanzados completamente dentro del periodo de análisis. Se concluye

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TESIS

**APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA
(NDVI) PARA LA DETECCIÓN, ANÁLISIS Y MONITOREO DE LA
RECUPERACIÓN DE ÁREAS DE TOTORA AFECTADAS POR INCENDIOS EN
LA RESERVA NACIONAL DEL TITICACA – 2023**

PRESENTADA POR:

BRANDON VLADIMIR VARGAS CHUQUIMIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE

: 
Mg. JULIO WILFREDO CANO OJEDA

PRIMER MIEMBRO

: 
Dra. CELIA VERENISSE ORTIZ DE ORUE ROJAS

SEGUNDO MIEMBRO

: 
M.Sc. KORINA ASQUI GOMEZ

ASESOR DE TESIS

: 
Dra. MARLENE CUSI MONTESINOS

Área: Ingeniería, Tecnología

Sub área: Ingeniería Ambiental

Línea de investigación: Ciencias Ambientales

Puno, 20 de mayo del 2026.

DEDICATORIA

A mi madre, por su amor incondicional, su paciencia infinita y por ser el motor constante que me impulsó cada día a no rendirme y a culminar este importante objetivo en mi vida. Su confianza y sus palabras de aliento fueron la fuerza que sostuvo este camino.

A mi hermano, por sus dudas y retos constantes, que lejos de desanimarme, se convirtieron en una motivación adicional para demostrar que con esfuerzo, perseverancia y disciplina todo es posible.

Y a todas las personas que, de una u otra forma, creyeron en mí y me acompañaron durante este proceso, brindándome apoyo, consejos y fortaleza para alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios por brindarme vida, fortaleza y sabiduría para superar cada dificultad y permitirme culminar esta importante etapa de mi formación profesional.

A mi madre, por su apoyo incondicional, su paciencia y su constante motivación, siendo el pilar fundamental que me impulsó a no rendirme y a perseverar hasta alcanzar esta meta.

A mi familia, por su comprensión, confianza y respaldo permanente durante todo este proceso académico.

Asimismo, manifiesto mi gratitud a mis docentes y asesores, quienes con sus conocimientos, orientación y exigencia académica contribuyeron significativamente en el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, hicieron posible la realización de este trabajo de tesis.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ANEXOS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1.1. PROBLEMA GENERAL	15
1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS	16
1.2. ANTECEDENTES	16
1.2.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES	16
1.2.2. ANTECEDENTES NACIONALES:	19
1.2.3. ANTECEDENTES LOCALES:	21
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	23

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO	25
2.1.1. ECOSISTEMAS DE HUMEDALES ALTOANDINOS	25
2.1.2. LA TOTORA Y SU IMPORTANCIA ECOLÓGICA	26
2.1.3. INCENDIOS FORESTALES EN HUMEDALES	29

2.1.4. TELEDETECCIÓN APLICADA AL MONITOREO AMBIENTAL	34
2.1.5. ÍNDICES DE VEGETACIÓN	38
2.1.6. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN Y SUS DIMENSIONES	42
2.2. MARCO CONCEPTUAL	46
2.3. MARCO LEGAL	52
2.3.1. NORMATIVA INTERNACIONAL	52
2.3.2. NORMATIVA NACIONAL	53
2.3.3. INSTRUMENTOS DE GESTIÓN DE LA RESERVA NACIONAL DEL TITICACA	55
2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	56
2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL	56
2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	56
CAPÍTULO III	
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	
3.1. ZONA DE ESTUDIO	57
3.1.1. DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS DE ANÁLISIS	58
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA	61
3.2.1. POBLACIÓN	61
3.2.2. MUESTRA	61
3.3. MÉTODO Y TÉCNICAS	62
3.3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	62
3.3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	62
3.3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	62
3.4. DISEÑO METODOLÓGICO POR OBJETIVO ESPECÍFICO	64
3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	67

CAPÍTULO IV

EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 1	69
4.2. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 2	72
4.3. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 3	73
4.4. PRUEBA DE HIPÓTESIS	83
4.4.1. PRUEBA DE HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1	83
4.4.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2	84
4.4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS ESPECÍFICA 3	87
4.4.4. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS GENERAL	89
4.5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	90
CONCLUSIONES	93
RECOMENDACIONES	95
BIBLIOGRAFÍA	97
ANEXOS	102

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 01: Interpretación ecológica de valores de niveles de NDVI	39
Tabla 02: Caracterización de las zonas de análisis del estudio	61
Tabla 03: Fechas de las imágenes satelitales Landsat utilizadas en el análisis multitemporal	64
Tabla 04: Matriz de operacionalización de variables	67
Tabla 05: Valores medios del NDVI preincendio y post incendio inmediato por zona de análisis	69
Tabla 06: Valores medios del NDVI por zona de análisis durante el periodo post incendio	72
Tabla 07: Evolución temporal del NDVI y fases de recuperación vegetal en las zonas incendiadas	74
Tabla 08: Tasa de recuperación mensual del NDVI en las zonas incendiadas (Δ NDVI entre periodos consecutivos)	82
Tabla 09: Resultados de la prueba de Mann-Whitney U – Hipótesis específica 1	84
Tabla 10: Resultados de la prueba de Mann-Whitney U – Hipótesis específica 2 (Zona A vs. Zona C)	85
Tabla 11: Resultados de la prueba de Mann-Whitney U – Hipótesis específica 2 (Zona B vs. Zona C)	86
Tabla 12: Síntesis de la tendencia de recuperación del NDVI – Zona A y Zona B	88
Tabla 13: Resumen de la contrastación de hipótesis	90

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01: Mapa de ubicación de las zonas de análisis (Zona A, Zona B y Zona C) en el sector Puno de la Reserva Nacional del Titicaca.	60
Figura 02: Comparación de imágenes satelitales Landsat (combinación 6-5-2) y mapas de NDVI preincendio (24/05/2023) y post incendio (09/06/2023) para las Zonas A y B.	71
Figura 03: Comparación de medias del nivel de NDVI de las tres zonas.	73
Figura 04: Evolución temporal de imágenes satelitales Landsat y mapas de NDVI en Zona A durante el periodo post incendio (junio 2023 – julio 2024).	77
Figura 05: Evolución temporal de imágenes satelitales Landsat y mapas de NDVI en Zona B durante el periodo post incendio (junio 2023 – julio 2024).	81
Figura 06: Tomando muestras de totora en la zona A.	110
Figura 07: Viaje realizado a las zonas de estudio (A, B y C)."	110
Figura 08: GPS usado para tomar los puntos en las zonas.	111

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 01: Matriz de consistencia	103
Anexo 02: Script de procesamiento del NDVI en Google Earth Engine	105
Anexo 03: Ficha de registro de valores del NDVI por zona y periodo	107
Anexo 04: Cálculos estadísticos relevantes – Prueba MANN-Whitney U	108
Anexo 05: Panel fotográfico	110

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la variación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca, mediante un análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat, considerando un mes previo y doce meses posteriores a la ocurrencia de incendios antrópicos registrados durante el año 2023. El estudio adoptó un enfoque cuantitativo de tipo aplicado, con diseño no experimental longitudinal, integrando técnicas de teledetección y análisis geoespacial para el cálculo y procesamiento del índice. Se delimitaron y compararon áreas afectadas por incendios con zonas de referencia no perturbadas, aplicando análisis estadísticos para determinar diferencias significativas en los valores del NDVI a lo largo del periodo evaluado. Los resultados evidenciaron una disminución significativa del índice inmediatamente después del evento de incendio, seguida de una recuperación progresiva de la cobertura vegetal durante los meses posteriores; sin embargo, los valores previos al disturbio no fueron alcanzados completamente dentro del periodo de análisis. Se concluye que el NDVI constituye una herramienta eficaz y confiable para el monitoreo de la dinámica de recuperación vegetal en ecosistemas de humedales altoandinos, generando información científica relevante que contribuye a la toma de decisiones en la gestión y conservación de los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca.

Palabras clave: incendios, NDVI, Recuperación vegetal, Teledetección, Totorales.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the variation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the reed beds of the Titicaca National Reserve, using a multi-temporal analysis of Landsat satellite images. The analysis considered the month before and months after the occurrence of twelve anthropogenic fires recorded during 2023. The study adopted a quantitative, applied approach with a longitudinal, non-experimental design, integrating remote sensing techniques and geospatial analysis for the calculation and processing of the index. Areas affected by fires were delineated and compared with undisturbed reference areas. Statistical analyses were applied to determine significant differences in NDVI values throughout the evaluation period. The results showed a significant decrease in the index immediately after the fire event, followed by a progressive recovery of vegetation cover in the subsequent months; however, pre-disturbance values were not fully reached within the analysis period. It is concluded that NDVI is an effective and reliable tool for monitoring the dynamics of plant recovery in high Andean wetland ecosystems, generating relevant scientific information that contributes to decision-making in the management and conservation of the totora reed beds of the Titicaca National Reserve.

Keywords: Fires, NDVI, Vegetation recovery, Remote sensing, Reedbeds.

INTRODUCCIÓN

La Reserva Nacional del Titicaca constituye uno de los humedales altoandinos de mayor relevancia ecológica y socioeconómica del Perú, albergando extensas formaciones de totora (*Schoenoplectus californicus* subsp. *tatora*) que cumplen funciones esenciales en la regulación hidrológica, la captura de carbono y la provisión de hábitat para diversas especies acuáticas, representando además un elemento cultural de vital importancia para las comunidades ribereñas del lago Titicaca.

Sin embargo, los totorales enfrentan una amenaza creciente por incendios de origen antrópico, ocasionados por prácticas de quema no controlada, que generan pérdida de cobertura vegetal, degradación de hábitats acuáticos y afectación de los servicios ecosistémicos locales, con un monitoreo sistemático aún limitado y discontinuo.

En este contexto, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), derivado de imágenes satelitales Landsat, constituye una herramienta eficiente y objetiva para cuantificar variaciones en la biomasa vegetal, detectar el impacto de incendios y evaluar procesos de regeneración ecológica en el tiempo.

La presente investigación evalúa la variación del NDVI en los totorales antes y durante los doce meses posteriores a los incendios antrópicos del año 2023, aportando evidencia científica para la gestión sostenible y conservación de la Reserva Nacional del Titicaca.

El informe se organiza en cuatro capítulos: el **Capítulo I** presenta el planteamiento del problema, antecedentes, justificación y objetivos; el **Capítulo II** desarrolla el marco teórico y la hipótesis; el **Capítulo III** describe la metodología y el procesamiento de imágenes satelitales; y el **Capítulo IV** expone los resultados del análisis multitemporal, conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Reserva Nacional del Titicaca (RNT) constituye uno de los humedales altoandinos más importantes del Perú y del sistema hidrológico del lago Titicaca, debido a su elevada biodiversidad, su rol estratégico en la regulación ecológica regional y su estrecha relación con las actividades socioeconómicas de las poblaciones locales. Este ecosistema lacustre alberga una compleja interacción entre componentes bióticos y abióticos, donde la vegetación acuática emergente desempeña un papel fundamental en el mantenimiento del equilibrio ambiental, la protección de hábitats acuáticos y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales.

Dentro de estos componentes, la totora (*Schoenoplectus californicus* subsp. *tatora*) representa la especie vegetal dominante y estructuralmente más relevante de los humedales del lago Titicaca. Su presencia no solo sustenta una amplia diversidad de fauna acuática —incluyendo aves, peces y macroinvertebrados— sino que además constituye un recurso económico y cultural vital para las comunidades ribereñas, particularmente para los pueblos originarios asentados en las islas flotantes. En este contexto, la totora cumple funciones ecológicas críticas como la captura de carbono, la estabilización de sedimentos, la regulación de nutrientes y la mejora de la calidad del agua.

Desde una perspectiva socioeconómica, esta especie tiene una importancia histórica y cultural significativa, ya que ha sido utilizada tradicionalmente por poblaciones como los

Uros para la construcción de viviendas, embarcaciones artesanales, infraestructura flotante y productos de valor comercial. Asimismo, constituye una fuente de alimentación para el ganado y un recurso complementario en actividades productivas locales, lo que refuerza su carácter estratégico dentro del sistema socioecológico del lago Titicaca.

No obstante, pese a su relevancia, los totorales de la RNT enfrentan múltiples presiones ambientales derivadas de actividades antrópicas y procesos de degradación progresiva. Entre estas amenazas destacan la contaminación hídrica, la expansión urbana, la sobreexplotación del recurso vegetal y, de manera creciente, la ocurrencia de incendios en áreas de vegetación acuática emergente. Estos eventos representan actualmente uno de los factores más críticos de deterioro del ecosistema, debido a su capacidad para alterar drásticamente la estructura vegetal, afectar la biodiversidad y comprometer los servicios ecosistémicos que sostienen la dinámica ecológica y económica de la región.

En los últimos años se ha registrado un incremento preocupante en la frecuencia, extensión e intensidad de incendios en los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca. Estos eventos son ocasionados principalmente por prácticas de quema no controlada realizadas por pobladores locales, quienes buscan renovar áreas de pastoreo, facilitar la extracción de totora o eliminar vegetación envejecida. Sin embargo, la ausencia de criterios técnicos, planes de manejo y supervisión institucional ha generado impactos ambientales significativos y, en muchos casos, irreversibles.

Los incendios en humedales altoandinos producen efectos ecológicos complejos que trascienden la simple pérdida de cobertura vegetal. En primer lugar, provocan la destrucción de la biomasa aérea y subterránea de la totora, reduciendo su capacidad de regeneración natural y alterando la estructura del ecosistema. Asimismo, generan la liberación de carbono almacenado, contribuyendo indirectamente al cambio climático regional. Desde el punto de vista hidrológico, la eliminación de la cobertura vegetal incrementa la erosión, afecta la estabilidad de los sedimentos y reduce la capacidad de filtración natural del agua.

Adicionalmente, los incendios impactan directamente en la biodiversidad asociada a los totorales, afectando zonas de reproducción, refugio y alimentación de numerosas especies. Las aves acuáticas, por ejemplo, dependen de la densidad y continuidad de la vegetación emergente para la nidificación, mientras que los peces y macroinvertebrados utilizan estas áreas como hábitat esencial durante distintas etapas de su ciclo de vida. Por lo tanto, la degradación de los totorales repercute en toda la cadena trófica del ecosistema lacustre.

Desde una perspectiva socioeconómica, estos incendios también generan efectos negativos significativos, ya que reducen la disponibilidad de materia prima para las comunidades locales, afectan actividades productivas tradicionales y disminuyen la resiliencia económica de las poblaciones que dependen directamente del recurso. De acuerdo con reportes institucionales del SERNANP, la ocurrencia recurrente de incendios constituye actualmente uno de los principales factores de presión ambiental dentro de la RNT, lo que evidencia la necesidad urgente de contar con herramientas de monitoreo y evaluación que permitan cuantificar objetivamente sus impactos.

A pesar de la magnitud de esta problemática, el monitoreo sistemático del impacto de los incendios sobre los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca ha sido limitado y discontinuo. Las evaluaciones existentes se basan principalmente en inspecciones de campo, reportes institucionales y observaciones cualitativas, lo que dificulta la obtención de información precisa, comparativa y temporalmente consistente. Además, factores logísticos, restricciones presupuestales y la complejidad geográfica del humedal han impedido el desarrollo de estudios extensivos y continuos sobre la dinámica de recuperación de la vegetación.

En este contexto, las tecnologías de teledetección emergen como una alternativa metodológica altamente eficiente para el análisis ambiental a gran escala. El uso de imágenes satelitales permite evaluar cambios espaciales y temporales en la cobertura vegetal con alta precisión, reduciendo costos operativos y facilitando el monitoreo continuo de áreas de difícil acceso. Dentro de estas herramientas, el Índice de Vegetación

de Diferencia Normalizada (NDVI) se ha consolidado como uno de los indicadores más utilizados a nivel mundial para evaluar la salud, densidad y vigor de la vegetación.

El NDVI permite identificar variaciones en la biomasa vegetal mediante el análisis de la reflectancia espectral de la vegetación, lo que lo convierte en un instrumento clave para detectar impactos causados por incendios forestales, cuantificar la pérdida de cobertura vegetal y analizar los procesos de regeneración ecológica en el tiempo. Su aplicación resulta particularmente relevante en ecosistemas de humedales, donde los cambios en la densidad vegetal pueden reflejar alteraciones ambientales significativas.

Sin embargo, a pesar de su potencial, actualmente no existen estudios específicos en la Reserva Nacional del Titicaca que utilicen análisis temporal del NDVI para evaluar el impacto de incendios sobre los totorales. Esta carencia de información científica limita la capacidad de las autoridades ambientales para diseñar estrategias de manejo sostenible, dificulta la planificación de acciones de restauración ecológica y restringe la toma de decisiones basadas en evidencia técnica.

Por ello, surge la necesidad de desarrollar investigaciones que integren herramientas de teledetección con análisis multitemporal del NDVI, considerando periodos de evaluación antes y después de eventos de incendio, así como zonas de referencia no afectadas. Este enfoque permitirá cuantificar objetivamente el impacto de los incendios en la cobertura de totora, evaluar su proceso de recuperación durante un periodo de doce meses y generar información científica que contribuya a la gestión sostenible y conservación del ecosistema de la Reserva Nacional del Titicaca.

1.1.1. PROBLEMA GENERAL

¿De qué manera la aplicación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) permite la detección, el análisis y el monitoreo del proceso de recuperación de las áreas de totora afectadas por incendios en la Reserva Nacional del Titicaca durante el año 2023?

1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cuál es la magnitud de la variación en los valores del NDVI entre el periodo previo al incendio y el periodo inmediato posterior en las zonas de totorales afectadas?
- ¿Existen diferencias estadísticamente significativas en los valores del NDVI entre las zonas impactadas por incendios y las zonas de referencia no afectadas dentro del mismo ecosistema?
- ¿Cómo evoluciona temporalmente el NDVI en las áreas de totorales incendiadas durante los doce meses posteriores al evento, en términos de su proceso de recuperación vegetal?

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Turco et al. (2022), en un estudio global publicado en Biogeosciences, analizaron la recuperación de la vegetación en diversos biomas afectados por incendios mediante el uso de sensores remotos y series temporales de índices espectrales. Objetivo: determinar los tiempos y patrones de recuperación vegetal post incendio en distintos tipos de ecosistemas a escala mundial. Metodología: se emplearon series temporales del NDVI derivadas de imágenes satelitales de múltiples sensores, comparando ecosistemas con diferente frecuencia e intensidad de incendios. Resultados relevantes: los incendios generan impactos prolongados sobre la vegetación, con tiempos de recuperación que varían de varios meses a años según la severidad del evento y las características del ecosistema, confirmando que el análisis multitemporal del NDVI es una herramienta eficaz para comprender los procesos de resiliencia ecológica. Este antecedente aporta un marco conceptual sólido para la presente investigación al demostrar la importancia del monitoreo temporal del NDVI en la evaluación de la recuperación vegetal posterior a incendios.

Lizaga et al. (2020), en una investigación publicada en la revista Forests, evaluaron la recuperación de la vegetación en ecosistemas de sabana tropical sometidos a incendios recurrentes mediante el uso del NDVI. Objetivo: cuantificar la velocidad de regeneración

vegetal y evaluar los procesos de resiliencia ecológica en hábitats con alta frecuencia de incendios. Metodología: se procesaron imágenes satelitales multitemporales para calcular el NDVI en zonas afectadas y zonas de referencia no perturbadas, estableciendo comparaciones antes y después de los eventos de quema. Resultados relevantes: el NDVI demostró ser una herramienta eficiente para el monitoreo continuo de la recuperación vegetal, permitiendo reducir los costos y tiempos asociados al monitoreo de campo, y evidenciando que ecosistemas con mayor humedad presentan tasas de regeneración más aceleradas. Este antecedente refuerza la pertinencia metodológica del presente estudio en ecosistemas de humedal.

Rodríguez et al. (2022) — Google Earth Engine + Landsat, incendios humedal Iberá, Argentina, Objetivo: analizar los incendios ocurridos en el humedal del Iberá (Argentina) en 2022 aplicando teledetección a través de Google Earth Engine. Metodología: se calcularon las áreas totales afectadas, la severidad mediante el NDVI y el NBR, procesando imágenes Landsat y Sentinel en la plataforma GEE. Resultados relevantes: se determinó que alrededor del 20% de la reserva y cerca del 50% del Parque Nacional Iberá fueron afectados, con predominio de niveles de severidad entre moderada-alta y alta; el NDVI permitió identificar con precisión las zonas quemadas y hacer seguimiento de la regeneración vegetal post incendio. Este antecedente es particularmente relevante por su aplicación del NDVI en un humedal sudamericano afectado por incendios de gran magnitud, en analogía directa con los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca.

Meng et al. (2022) — análisis NDVI recuperación vegetal post incendio, series temporales Landsat: Objetivo: evaluar la tasa de recuperación de la vegetación post incendio mediante series temporales del NDVI en ecosistemas forestales de distinta composición. Metodología: se procesaron colecciones de imágenes Landsat a través de análisis multitemporal del NDVI, identificando el tiempo necesario para que la respuesta fotosintética de la vegetación alcanzara los valores previos al incendio. Resultados relevantes: los sensores remotos mostraron que la respuesta fotosintética de la vegetación se recupera en los siguientes 5 a 10 años tras el paso del fuego, aunque este

indicador no aporta información directa sobre cambios en la composición florística ni en la estructura del ecosistema; se evidenció además que la severidad del incendio es el principal factor determinante en la velocidad de recuperación. Este antecedente refuerza el enfoque multitemporal del NDVI como herramienta de monitoreo post incendio utilizado en la presente investigación.

CentroGeo México (2023) — análisis comparativo de índices de vegetación en zonas afectadas por incendios 2021–2023: Objetivo: investigar la recuperación de la vegetación en zonas afectadas por incendios forestales en la Sierra Madre Occidental mediante el análisis comparativo de índices de vegetación y transformaciones espectrales. Metodología: se emplearon imágenes del producto MODIS MCD64A1 y técnicas de Google Earth Engine para calcular el NDVI y el SAVI en periodos anuales de 2021 a 2023, comparando áreas quemadas con zonas de referencia. Resultados relevantes: el NDVI disminuyó de 0.32 en 2021 a 0.20 en 2022 y 0.19 en 2023 en las áreas afectadas, evidenciando una lenta recuperación de la vegetación; los resultados confirmaron la sensibilidad del NDVI para detectar impactos de incendios y monitorear la dinámica de regeneración en el tiempo. Este antecedente aporta evidencia cuantitativa reciente sobre la variación del NDVI en ecosistemas afectados por incendios, aspecto central en la presente investigación.

Aguado et al. (2022) — Google Earth Engine, Landsat, seguimiento NDVI post incendio, España Objetivo: evaluar y dar seguimiento a la respuesta de la vegetación tras incendios forestales mediante el análisis de series temporales del NDVI a través de Google Earth Engine. Metodología: se utilizaron 734 imágenes Landsat con corrección radiométrica, geométrica y atmosférica, calculando automáticamente el NDVI para geometrías de incendios ocurridos entre 1993 y 2021 en el sureste de España. Resultados relevantes: la tasa de recuperación mínima fue de aproximadamente 4 a 5 años para la mayoría de los perímetros evaluados; el análisis de severidad permitió identificar zonas gravemente afectadas cuya recuperación fue significativamente más lenta, confirmando que el NDVI es una herramienta eficaz para el seguimiento continuo de la regeneración vegetal post

incendio a escala temporal. Este antecedente valida metodológicamente el enfoque de la presente investigación al demostrar la utilidad del análisis multitemporal del NDVI en Landsat para el monitoreo de ecosistemas afectados.

1.2.2. ANTECEDENTES NACIONALES:

Ferro et al.(2024), en su tesis desarrollada en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, analizó el índice NDVI de la flora en áreas incendiadas y no incendiadas en la cuenca del río Huatanay entre el 2017 y el 2022. Objetivo: investigar la distribución espacial de los incendios y las diferencias en el NDVI y la composición florística entre áreas afectadas y no afectadas por incendios. Metodología: se recopiló información de incendios a través de INDECI, SERFOR y Google Earth Pro, georeferenciando su ubicación y extensión anual; se realizaron transectos por intersección en seis sitios seleccionados de diferentes años, y se obtuvo información del NDVI del servicio MODIS VIIRS Subsets de la NASA para el análisis multitemporal. Resultados relevantes: los incendios en la cuenca del Huatanay presentaron una distribución aleatoria con mayor incidencia en el año 2020; aplicando el análisis de puntos calientes G_i^* de Getis-Ord, se identificó una concentración de eventos en los distritos de Oropesa, Lucre, San Sebastián y San Jerónimo, y se evidenciaron diferencias significativas en los valores del NDVI entre zonas quemadas y no quemadas. Este antecedente resulta altamente relevante para la presente investigación por su aplicación directa del NDVI en el análisis de incendios en ecosistemas andinos del Perú.

Lazo et al.(2024), en una tesis desarrollada en la Pontificia Universidad Católica del Perú, propuso un modelo para la segmentación y análisis de gravedad de áreas afectadas por incendios forestales usando redes neuronales convolucionales e imágenes satelitales. Objetivo: desarrollar un modelo de red neuronal que permita integrar el análisis de la magnitud y extensión de los daños generados por incendios, y apoyar la planificación de planes de recuperación del área afectada. Metodología: se consultó el historial de incendios en el monitoreo de SERFOR, se obtuvieron imágenes del satélite Sentinel-2 y Landsat 8, las cuales fueron procesadas en fragmentos de 512 x 512 píxeles con

etiquetado manual del área afectada; el modelo neuronal fue entrenado y validado con ambos conjuntos de imágenes, incorporando el índice de calcinación normalizado para estimar la gravedad. Resultados relevantes: el modelo desarrollado logró segmentar con precisión las áreas afectadas por incendios y estimar la severidad del impacto mediante índices espectrales, demostrando la complementariedad entre herramientas de inteligencia artificial y teledetección en el análisis de incendios forestales. Este antecedente aporta sustento metodológico a la presente investigación al confirmar la utilidad de los índices espectrales derivados de imágenes Landsat para evaluar el impacto de incendios sobre la cobertura vegetal.

El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2022) desarrolló un estudio sobre la aplicación de imágenes satelitales en el monitoreo ambiental del territorio peruano. Objetivo: destacar el uso de sensores Landsat para evaluar cambios en la cobertura vegetal y detectar áreas afectadas por incendios forestales a escala nacional. Metodología: se analizaron series de imágenes Landsat aplicando índices espectrales, entre ellos el NDVI, para identificar variaciones en la cobertura vegetal y monitorear procesos de regeneración en diferentes ecosistemas del Perú. Resultados relevantes: los índices espectrales permitieron identificar con precisión la reducción de la cobertura vegetal posterior a incendios y monitorear los procesos de regeneración, demostrando que el uso de imágenes satelitales facilita el monitoreo continuo de áreas extensas con bajos costos operativos. Este antecedente respalda la viabilidad técnica del enfoque metodológico de la presente investigación.

Camas & Maman et al. (2022) — Humedales de Ventanilla, NDVI, teledetección, Objetivo: evaluar el estado de la vegetación y la saturación del suelo en el Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla mediante herramientas de teledetección durante el periodo 2006–2021. Metodología: se delimitó el área de estudio, se adquirieron y preprocesaron imágenes satelitales, y se aplicaron los índices NDVI e ICEDEX junto con clasificación no supervisada para analizar los cambios en la cobertura vegetal y el estado del suelo. Resultados relevantes: el NDVI permitió identificar zonas de degradación

vegetal asociadas a presiones antrópicas y eutrofización, evidenciando que las herramientas de teledetección son eficaces para el monitoreo continuo de humedales costeros peruanos sujetos a perturbaciones humanas. Este estudio resulta relevante para la presente investigación al validar el uso del NDVI en el monitoreo de humedales peruanos bajo presión antrópica, en condiciones ecológicas comparables a las de los totorales del lago Titicaca.

El Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (2020) desarrolló un informe técnico sobre el estado de conservación de la Reserva Nacional del Titicaca, en el cual se identificó un incremento significativo de incendios en los totorales durante la última década. El documento señala que estos incendios son principalmente de origen antrópico, asociados a prácticas tradicionales de quema para renovación de pastos, ampliación de áreas de uso o limpieza de vegetación.

El informe destaca que los incendios generan impactos severos sobre la estructura ecológica del humedal, produciendo pérdida de cobertura vegetal, reducción de hábitats para especies acuáticas y alteración de los servicios ecosistémicos vinculados a la regulación hídrica y la calidad del agua. Asimismo, se reconoce que el monitoreo del impacto de estos eventos se realiza de manera limitada debido a restricciones logísticas, lo que dificulta la evaluación sistemática de los procesos de recuperación. Este antecedente resulta fundamental para la presente investigación, ya que evidencia la problemática real de los incendios en los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca y resalta la necesidad de implementar metodologías de monitoreo basadas en teledetección que permitan evaluar los impactos y la recuperación de la vegetación.

1.2.3. ANTECEDENTES LOCALES:

Aponte et al.(2017), en un artículo publicado en la revista Ecología Aplicada de la Universidad Nacional Agraria La Molina, evaluaron los primeros estadios de regeneración natural de la vegetación post incendio en los Humedales de Ventanilla, Lima. Objetivo: dar a conocer los cambios en la cobertura, densidad, crecimiento y diversidad de especies vegetales durante los primeros 155 días posteriores a un incendio ocurrido en el

Área de Conservación Regional de Ventanilla. Metodología: se establecieron 51 parcelas de 1 m² donde se registraron el número de tallos sobrevivientes por especie, la longitud de nuevos rebrotes, el estadio fenológico de cada tallo y la cobertura vegetal mediante estimación visual. Resultados relevantes: la especie *Schoenoplectus americanus* mostró la mayor velocidad de recuperación, alcanzando una cobertura promedio del 82% y representando el 81% de la abundancia de tallos totales en los primeros 155 días; los índices de diversidad Shannon-Wiener y Simpson evidenciaron que la diversidad alfa alcanzó su punto máximo dentro del periodo evaluado. Este antecedente es de especial relevancia para la presente investigación, dada la similitud ecológica entre los humedales de Ventanilla y los totorales del lago Titicaca, ambos sujetos a perturbaciones por incendios antrópicos.

SERNANP (2023) — Informe de incendios en la RNT 2023, Objetivo: documentar y registrar los eventos de incendio ocurridos en la Reserva Nacional del Titicaca durante el año 2023, identificando las zonas afectadas, extensión y origen. Metodología: se sistematizaron reportes de campo de los guardaparques, se georreferenciaron las áreas quemadas y se elaboraron fichas técnicas de cada evento registrado. Resultados relevantes: se reportó la ocurrencia de múltiples eventos de incendio de origen antrópico en sectores de totorales de la reserva durante 2023, coincidiendo con el periodo de sequía histórica que afectó al lago Titicaca; el 84% de los totorales de las áreas protegidas presentaron afectación por desecamiento, incrementando su vulnerabilidad frente a las quemadas. Este antecedente es el más directamente vinculado a la presente investigación por corresponder al mismo contexto espacial y temporal del estudio.

Senamhi Puno (2023) — Monitoreo hídrico y ambiental del lago Titicaca, Objetivo: monitorear y documentar el descenso histórico del nivel del lago Titicaca durante 2022–2023 y sus efectos sobre el ecosistema, incluyendo los totorales. Metodología: se realizaron mediciones periódicas del nivel hídrico del lago, se analizaron datos de precipitación de estaciones meteorológicas regionales y se sistematizó información de campo sobre el estado de los totorales. Resultados relevantes: en noviembre de 2023 se

registró el segundo nivel más bajo histórico del lago Titicaca, con un déficit hídrico del 49% en el altiplano de Puno; el 84% de los totorales de las áreas protegidas se encontraban secos, lo que incrementó drásticamente la ocurrencia de incendios antrópicos en la reserva. Este antecedente aporta el contexto ambiental directo que explica la vulnerabilidad de los totorales ante los incendios estudiados en la presente investigación.

COEN — Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (2023) — Monitoreo de incendios en totorales de Puno, Objetivo: monitorear y gestionar la respuesta ante los incendios forestales recurrentes en los totorales del lago Titicaca, específicamente en el distrito de Chucuito, provincia de Puno. Metodología: se implementó un sistema de monitoreo continuo con equipos de respuesta rápida ante incendios, registrando la extensión, frecuencia y condiciones de propagación de los eventos de quema en los totorales. Resultados relevantes: se reportaron incendios recurrentes en sectores de totorales impulsados por vientos fuertes que dificultaron las labores de contención; los eventos amenazaron directamente la estabilidad de las islas flotantes y los medios de vida de las comunidades locales, evidenciando la urgencia de implementar sistemas de monitoreo y alerta temprana basados en tecnología satelital. Este antecedente local refuerza la relevancia y oportunidad de la presente investigación, al documentar los eventos de incendio ocurridos en el mismo ámbito de estudio.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo General

Evaluar la variación multitemporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en los totorales afectados por incendios en la Reserva Nacional del Titicaca durante el año 2023.

Objetivos Específicos

- Determinar la variación de los valores del NDVI en los totorales antes y después de la ocurrencia de incendios forestales en las zonas de estudio.

- Comparar los valores del NDVI entre las áreas afectadas por incendios y una zona de referencia no impactada dentro del mismo ecosistema.
- Analizar la evolución temporal del NDVI en los totorales incendiados durante los doce meses posteriores al evento, a fin de caracterizar su proceso de recuperación vegetal.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. ECOSISTEMAS DE HUMEDALES ALTOANDINOS

Los humedales constituyen ecosistemas de transición entre ambientes terrestres y acuáticos, caracterizados por la presencia permanente o temporal de agua superficial o subsuperficial, lo que determina condiciones particulares de suelo, vegetación y biodiversidad. De acuerdo con la Convención Ramsar, comprenden una amplia gama de sistemas naturales como lagos, ríos, marismas, pantanos, turberas y cuerpos de agua someros, que desempeñan funciones ecológicas fundamentales para el equilibrio ambiental global (Ramsar Convention Secretariat, 2016).

Desde el punto de vista ecológico, los humedales son considerados entre los ecosistemas más productivos del planeta. Mitsch y Gosselink (2015) señalan que cumplen funciones esenciales como la regulación del ciclo hidrológico, la retención de sedimentos, la depuración de contaminantes y el mantenimiento de la biodiversidad, actuando además como amortiguadores naturales frente a eventos climáticos extremos. Su importancia global se evidencia en su contribución a los servicios ecosistémicos, incluyendo la provisión de agua dulce, la regulación del clima y el almacenamiento de carbono. No obstante, estos ecosistemas han experimentado una degradación significativa a nivel mundial, con una pérdida estimada superior al 35% de su superficie desde el siglo XX (Davidson, 2018).

Dentro de esta diversidad, los humedales altoandinos presentan características ecológicas particulares asociadas a su ubicación en regiones de alta montaña,

generalmente por encima de los 3 000 m s.n.m., donde predominan bajas temperaturas, elevada radiación solar y alta amplitud térmica (Squeo et al., 2006). Estos ecosistemas desempeñan un papel crucial en la regulación del ciclo hidrológico regional, actuando como reservorios naturales que almacenan agua en temporada húmeda y la liberan gradualmente en periodos secos. Asimismo, albergan especies altamente especializadas — aves migratorias, peces endémicos, macroinvertebrados y plantas hidrófitas — muchas de distribución restringida y alto valor ecológico (Finlayson et al., 2019).

En el contexto sudamericano, el sistema lacustre Titicaca constituye uno de los humedales altoandinos más relevantes por su elevada diversidad biológica, su rol en la regulación hidrológica y su importancia cultural para las comunidades que dependen de sus recursos. En este sistema se ubica la Reserva Nacional del Titicaca, área natural protegida que alberga extensas formaciones de totorales que desempeñan funciones ecológicas clave, actuando como filtros naturales, estabilizadores del sustrato y proveedores de hábitat para numerosas especies acuáticas (SERNANP, 2020).

Desde una perspectiva biogeoquímica, los humedales altoandinos funcionan como importantes sumideros de carbono, almacenando grandes cantidades de biomasa vegetal y materia orgánica en sus sedimentos, con una contribución significativa a la mitigación del cambio climático (Turetsky et al., 2015). Sin embargo, su limitada capacidad de resiliencia los convierte en ecosistemas altamente vulnerables frente a perturbaciones como el cambio climático, la contaminación y los incendios de origen antrópico, cuya ocurrencia recurrente representa actualmente una de las principales amenazas para su integridad ecológica (Finlayson et al., 2019).

2.1.2. LA TOTORA Y SU IMPORTANCIA ECOLÓGICA

2.1.2.1 Características y distribución de la totora

La totora (*Schoenoplectus californicus* subsp. *tatora*) es una planta macrófita emergente perteneciente a la familia Cyperaceae, ampliamente distribuida en ecosistemas acuáticos de América del Sur, especialmente en lagos, lagunas y humedales de zonas templadas y altoandinas. Se caracteriza por su elevada capacidad de adaptación a ambientes

inundables, su rápido crecimiento vegetativo y su rol estructural determinante en los ecosistemas lacustres.

Morfológicamente, presenta tallos cilíndricos, erectos y flexibles que pueden alcanzar entre dos y cuatro metros de altura según las condiciones ambientales. Estos tallos se originan a partir de un sistema rizomatoso subterráneo altamente desarrollado que permite la propagación vegetativa y la formación de extensas colonias. Los rizomas cumplen funciones fundamentales en el almacenamiento de nutrientes, la fijación del sedimento y la regeneración de la planta después de disturbios, lo que explica su alta resiliencia en ecosistemas dinámicos (Chambers et al., 2021).

En la Reserva Nacional del Titicaca, los totorales se desarrollan principalmente en zonas litorales poco profundas, donde la distribución espacial responde a gradientes ecológicos de profundidad del agua, estabilidad del sustrato, disponibilidad de nutrientes y fluctuaciones estacionales del nivel hídrico. Estos factores determinan la densidad, estructura y dinámica de los totorales, influyendo directamente en su capacidad de adaptación y resiliencia frente a cambios ambientales (SERNANP, 2020).

2.1.2.2. Importancia ecológica y servicios ecosistémicos de los totorales

Los totorales constituyen uno de los componentes ecológicos más relevantes de los humedales altoandinos debido a su papel en el mantenimiento de la estabilidad ambiental, la conservación de la biodiversidad y la regulación de procesos ecológicos esenciales. La totora actúa como especie estructural dominante, generando zonas de refugio, reproducción y alimentación para peces, anfibios, aves acuáticas y macroinvertebrados, contribuyendo significativamente al mantenimiento de la diversidad biológica del ecosistema (Mitsch & Gosselink, 2015).

Entre sus principales funciones ecológicas destacan la estabilización del sustrato lacustre mediante su sistema radicular, que retiene sedimentos y reduce la erosión favoreciendo la claridad del agua; la regulación biogeoquímica mediante la absorción de nitrógeno y fósforo, contribuyendo a la depuración natural del agua y reduciendo procesos de eutrofización; y el almacenamiento de carbono tanto en su biomasa aérea como en el

sistema rizomatoso subterráneo, función que cobra especial relevancia cuando eventos como incendios liberan grandes cantidades de carbono a la atmósfera, generando impactos negativos en el balance climático (Fluet-Chouinard et al., 2023).

Desde el punto de vista de los servicios ecosistémicos, los totorales proveen beneficios de provisión, regulación, soporte y culturales. En términos de provisión, la totora constituye un recurso de gran valor económico para las comunidades locales, utilizada en la construcción de viviendas, embarcaciones tradicionales, islas flotantes y artesanías, además de emplearse como forraje para el ganado (SERNANP, 2020). En el lago Titicaca, comunidades como los Uros mantienen un vínculo histórico y cultural con este recurso, lo que representa un patrimonio intangible de importancia significativa. Desde una perspectiva de regulación, los totorales influyen en el microclima local, moderan la temperatura, participan en procesos de evapotranspiración y regulan el flujo hídrico del ecosistema lacustre (Ramsar Convention Secretariat, 2016).

La degradación de estos ecosistemas por factores como la contaminación, la sobreexplotación, el cambio climático y los incendios antrópicos implica la pérdida de todos estos servicios, afectando tanto la estabilidad ambiental como el bienestar de las comunidades que dependen de ellos. En este contexto, el monitoreo de la cobertura vegetal mediante el índice NDVI se convierte en un instrumento fundamental para evaluar el estado de conservación de los totorales y apoyar la gestión ambiental basada en evidencia científica (Pettorelli, 2021).

2.1.2.3. Regeneración y respuesta de la totora frente a disturbios

La capacidad de regeneración de la totora constituye uno de los procesos ecológicos más relevantes para la sostenibilidad de los humedales altoandinos. Esta especie posee una notable resiliencia debido a su sistema rizomatoso subterráneo, que le permite sobrevivir a condiciones adversas y restablecer su cobertura vegetal en periodos relativamente cortos (Chambers et al., 2021).

La regeneración se produce principalmente mediante propagación vegetativa. Los rizomas generan nuevos brotes que emergen hacia la superficie formando tallos

independientes, incluso cuando la biomasa aérea ha sido parcial o totalmente destruida por disturbios como incendios, inundaciones o cortes mecánicos. La velocidad de este proceso depende de la disponibilidad de nutrientes, la profundidad del agua, la temperatura y la estabilidad del sustrato. En condiciones favorables, los nuevos brotes pueden emerger pocas semanas después de una perturbación (Mitsch & Gosselink, 2015).

Frente a disturbios de alta intensidad, como los incendios antrópicos, el impacto sobre los totales puede ser severo. Los incendios destruyen la biomasa aérea casi en su totalidad, reducen abruptamente la actividad fotosintética, alteran las propiedades físicas y químicas del sedimento mediante la liberación de cenizas y nutrientes, y pueden dañar los rizomas cuando el fuego alcanza alta temperatura y prolongada duración (Turetsky et al., 2022). La magnitud de este daño determina directamente la velocidad de recuperación del ecosistema.

Después del disturbio, la dinámica de recuperación sigue una secuencia temporal definida: una fase inicial de cobertura mínima, seguida de la emergencia de nuevos brotes desde rizomas sobrevivientes, el incremento progresivo de densidad y altura de la vegetación, y finalmente la estabilización ecológica donde el sistema alcanza condiciones similares a las previas al evento. Sin embargo, la recuperación completa puede extenderse desde varios meses hasta más de un año, dependiendo de la severidad del incendio, las condiciones hidrológicas y la recurrencia de disturbios (Aponte et al., 2017).

Estas variaciones en la biomasa y actividad fotosintética durante el proceso de recuperación tienen una expresión directa en la respuesta espectral del ecosistema, lo que permite su evaluación y seguimiento mediante índices de vegetación como el NDVI, convirtiendo a esta herramienta en un instrumento clave para el monitoreo postdisturbio en humedales altoandinos.

2.1.3. INCENDIOS FORESTALES EN HUMEDALES

Los incendios forestales constituyen uno de los disturbios ecológicos más significativos que afectan a los ecosistemas de humedales altoandinos. Aunque tradicionalmente se

asocian a ambientes forestales y pastizales, en las últimas décadas se ha evidenciado un incremento en su ocurrencia en zonas húmedas, especialmente en áreas donde predominan comunidades vegetales emergentes como los totorales. Estos eventos generan alteraciones profundas en la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos, comprometiendo su integridad ecológica y los servicios ambientales que proveen a las comunidades locales (Turetsky et al., 2022).

Desde una perspectiva ecológica, el fuego actúa como un agente de perturbación que modifica las dinámicas del ecosistema al afectar la vegetación, el suelo y los ciclos biogeoquímicos. Pyne (2019) señala que este proceso puede generar tanto efectos negativos inmediatos como procesos de regeneración a largo plazo, dependiendo de su intensidad, frecuencia y extensión. En el caso particular de los humedales, los incendios presentan características propias debido a las condiciones hidrológicas y al tipo de vegetación dominante, pudiendo afectar tanto la biomasa aérea como los suelos orgánicos y las raíces, generando efectos ecológicos prolongados (Mitsch & Gosselink, 2015).

2.1.3.1. Condiciones que favorecen la ocurrencia y propagación de incendios

La severidad y propagación de los incendios en ecosistemas de totorales dependen de la interacción compleja entre factores ambientales, biológicos y antrópicos. Entre los más determinantes se encuentran:

La disponibilidad hídrica constituye el factor de mayor influencia. En condiciones normales, la alta humedad del suelo y de la vegetación actúa como mecanismo natural de resistencia al fuego. Sin embargo, durante periodos de sequía o descenso del nivel hídrico, la vegetación emergente experimenta procesos de desecación que incrementan drásticamente su inflamabilidad. En el caso del lago Titicaca, el registro del segundo nivel hídrico más bajo de su historia en el año 2023, con un déficit del 49% en la precipitación del altiplano puneño, determinó que el 84% de los totorales de las áreas protegidas se encontraran secos, incrementando exponencialmente el riesgo de incendios (SENAMHI, 2023).

La acumulación de biomasa seca o carga de combustible vegetal representa otro factor crítico. Durante la fase de senescencia natural, los tallos secos de totora generan grandes cantidades de material orgánico altamente inflamable que, en condiciones de alta densidad vegetal, facilita la propagación rápida del fuego (Fluet-Chouinard et al., 2023).

Las condiciones climáticas, incluyendo temperaturas elevadas, baja humedad relativa y vientos intensos, favorecen la expansión e intensidad del incendio, mientras que la actividad humana representa la principal fuente de ignición. De acuerdo con la Ramsar Convention Secretariat (2016), más del 90% de los incendios en humedales a nivel global tienen origen antrópico, asociados principalmente a prácticas de quema para renovación de pastizales, ampliación de áreas de uso y eliminación de residuos vegetales sin control técnico ni supervisión institucional.

2.1.3.2. Impactos ecológicos de los incendios en los totorales

Los incendios producen una serie de efectos inmediatos y a largo plazo sobre la estructura y funcionalidad de los totorales. Durante el evento, la parte aérea de la vegetación es consumida casi en su totalidad, generando una disminución abrupta en la actividad fotosintética y en la productividad primaria del ecosistema. Esta pérdida afecta directamente la disponibilidad de refugio y alimento para numerosas especies acuáticas, incluyendo aves, peces e invertebrados (Ramsar Convention Secretariat, 2016).

La combustión de la biomasa vegetal libera nutrientes y cenizas que se incorporan al sistema lacustre, alterando los procesos biogeoquímicos y pudiendo desencadenar fenómenos de eutrofización y disminución del oxígeno disuelto. Desde el punto de vista hidrológico, la eliminación de la cobertura vegetal reduce la capacidad del totoral para retener sedimentos y estabilizar el sustrato, incrementando el riesgo de erosión y resuspensión de partículas que afectan la penetración de la luz y limitan la recuperación vegetal (Turetsky et al., 2022).

En términos climáticos, los incendios en humedales representan una fuente significativa de emisiones de carbono, especialmente cuando afectan suelos orgánicos ricos en materia vegetal acumulada. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático señala que

estos eventos contribuyen al incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera, agravando los efectos del cambio climático a escala regional y global (IPCC, 2021).

La magnitud del impacto ecológico depende directamente de la severidad del incendio. En eventos de baja intensidad, los rizomas subterráneos pueden permanecer intactos, permitiendo la regeneración natural del totoral en periodos relativamente cortos. Sin embargo, cuando el fuego alcanza altas temperaturas y se prolonga durante periodos extensos, puede afectar los tejidos subterráneos, reduciendo significativamente la capacidad de rebrote y extendiendo el tiempo necesario para la recuperación ecológica del sistema (Chambers et al., 2021).

2.1.3.3. Dinámica de recuperación ecológica postincendio

La recuperación ecológica posterior a un incendio constituye un proceso fundamental para la restauración de la estructura y funcionalidad de los totorales. Este proceso implica una serie de cambios progresivos en la vegetación, el suelo y las interacciones biológicas que determinan la velocidad y el grado de retorno del ecosistema a sus condiciones previas al disturbio (Mitsch & Gosselink, 2015).

La dinámica de recuperación sigue una secuencia temporal definida por cuatro fases ecológicas. La primera corresponde al periodo inmediato posterior al disturbio, caracterizado por la pérdida casi total de biomasa aérea, la reducción drástica de la actividad fotosintética y la exposición del sustrato. La segunda fase corresponde al inicio de la regeneración vegetal a partir de rizomas sobrevivientes, que generan nuevos brotes facilitando la recuperación inicial de la cobertura. En la tercera fase se desarrolla el crecimiento y expansión de la vegetación, restableciendo progresivamente funciones ecológicas clave como la retención de sedimentos y la provisión de hábitat. Finalmente, la fase de estabilización ecológica implica el retorno del sistema a condiciones similares a las previas al incendio, proceso que puede extenderse desde varios meses hasta más de un año dependiendo de las condiciones ambientales y la recurrencia de disturbios (Aponte et al., 2017).

Desde la perspectiva del monitoreo ambiental, esta dinámica de recuperación puede evaluarse de manera objetiva mediante indicadores ecológicos relacionados con la cobertura vegetal y la actividad fotosintética. En este contexto, la teledetección satelital permite realizar un seguimiento multitemporal preciso del proceso de regeneración, identificando cambios espaciales y temporales en la vegetación mediante índices espectrales como el NDVI, cuya disminución abrupta indica la ocurrencia del disturbio y cuyos incrementos progresivos reflejan el proceso de recuperación ecológica (Pettorelli, 2021).

2.1.3.4. Importancia del monitoreo de incendios en la Reserva Nacional del Titicaca

En los humedales del lago Titicaca, los incendios en totorales son predominantemente de origen antrópico y su ocurrencia se ha incrementado de manera preocupante en los últimos años. El Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado ha identificado estos eventos como una de las principales amenazas para la conservación del ecosistema, señalando que las quemas no controladas generan pérdida de cobertura vegetal, reducción de hábitat para especies acuáticas y afectación directa de los servicios ecosistémicos que sustentan a las poblaciones locales (SERNANP, 2023).

El monitoreo sistemático de estos eventos resulta indispensable para comprender la evolución temporal del ecosistema después del disturbio, identificar zonas críticas, prevenir procesos de degradación y orientar acciones de control y restauración. Sin embargo, los métodos tradicionales basados en inspecciones de campo y reportes institucionales presentan limitaciones significativas en términos de cobertura espacial, continuidad temporal y costos logísticos, especialmente en ecosistemas de difícil acceso como los totorales del lago Titicaca (SERNANP, 2020).

Frente a estas restricciones, el monitoreo mediante tecnologías de teledetección ha adquirido una importancia creciente. El uso de sensores remotos permite analizar cambios en la cobertura vegetal, detectar áreas afectadas por disturbios y evaluar la dinámica de recuperación ecológica con alta precisión y cobertura espacial, constituyendo

una herramienta fundamental para la gestión ambiental y la toma de decisiones basada en evidencia científica en áreas naturales protegidas (Pettorelli, 2021).

2.1.4. TELEDETECCIÓN APLICADA AL MONITOREO AMBIENTAL

2.1.4.1. Fundamentos de la teledetección

La teledetección constituye una herramienta fundamental para el estudio y monitoreo del medio ambiente, permitiendo obtener información de la superficie terrestre sin necesidad de contacto directo con el objeto de estudio. Este proceso se basa en la captación, registro y análisis de la radiación electromagnética reflejada o emitida por los diferentes elementos presentes en el entorno natural. Chuvieco (2020) define la teledetección como el conjunto de técnicas que permiten adquirir información sobre la superficie terrestre mediante sensores instalados en plataformas aéreas o satelitales, los cuales registran la energía reflejada en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, generando datos interpretables para identificar características físicas, químicas y biológicas de los objetos observados.

El principio fundamental de la teledetección radica en la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Cuando la energía solar incide sobre la superficie terrestre, una parte es absorbida, otra es transmitida y otra es reflejada. La proporción de estos procesos depende de las propiedades físicas y estructurales de cada material, lo que permite diferenciar entre agua, suelo, vegetación y otros elementos mediante su firma espectral característica. En el caso particular de la vegetación, las plantas absorben intensamente la radiación en la región del espectro visible, especialmente en la banda roja, debido a la presencia de pigmentos fotosintéticos como la clorofila, mientras que reflejan de manera intensa en la región del infrarrojo cercano debido a la estructura interna de las hojas. Esta propiedad espectral constituye la base para el desarrollo de índices de vegetación como el NDVI (Jensen, 2016).

Un sistema de teledetección está conformado por varios elementos que interactúan entre sí: la fuente de energía, la interacción con la atmósfera, el objeto observado, el sensor, la plataforma de observación y el sistema de procesamiento de datos. La principal fuente de

energía en la teledetección pasiva es la radiación solar, que durante su trayectoria atraviesa la atmósfera, donde puede sufrir procesos de dispersión y absorción que influyen en la calidad de los datos obtenidos. Los sensores pueden clasificarse según su resolución espacial, espectral, temporal y radiométrica, características que determinan su capacidad para identificar detalles específicos en la superficie terrestre (Chuvienco, 2020).

2.1.4.2. Teledetección aplicada al monitoreo de humedales y cobertura vegetal

La teledetección se ha consolidado como una herramienta esencial para el monitoreo ambiental debido a su capacidad para proporcionar información continua, objetiva y de amplia cobertura espacial sobre los ecosistemas terrestres y acuáticos. A diferencia de los métodos tradicionales de campo, esta tecnología permite analizar grandes extensiones territoriales en periodos cortos de tiempo y con costos relativamente bajos, características que han impulsado su uso en la evaluación ambiental a escala regional y global (Gómez et al., 2023).

En el contexto del monitoreo ambiental, la teledetección se utiliza ampliamente para evaluar cambios en la cobertura del suelo, analizar procesos de degradación ecológica, monitorear la dinámica de la vegetación y detectar eventos como incendios forestales, inundaciones y sequías. Su capacidad de observación repetitiva permite estudiar la evolución temporal de los ecosistemas, lo que resulta fundamental para comprender los efectos de los disturbios ambientales sobre la cobertura vegetal (Jensen, 2016).

En el ámbito específico de los humedales, la teledetección ofrece ventajas significativas frente al monitoreo convencional. Permite identificar variaciones en la cobertura vegetal asociadas a cambios hidrológicos, perturbaciones antrópicas y eventos extremos, así como analizar la distribución de la vegetación emergente y evaluar los impactos de disturbios como la contaminación y los incendios. La disponibilidad histórica de archivos de imágenes satelitales posibilita reconstruir la evolución temporal de los ecosistemas, lo que resulta fundamental para evaluar procesos de degradación y recuperación (Fluet-Chouinard et al., 2023).

En el caso de los totorales del lago Titicaca, la teledetección permite superar las limitaciones logísticas del monitoreo de campo, derivadas de la extensión del ecosistema, la accesibilidad restringida en algunas zonas y los elevados costos operativos. Mediante el análisis de imágenes satelitales es posible evaluar la variabilidad espacial y temporal de la cobertura vegetal, identificar áreas afectadas por incendios y analizar los procesos de recuperación ecológica con alta precisión y cobertura espacial (INGEMMET, 2022).

2.1.4.3. Imágenes satelitales Landsat en el monitoreo ambiental

El programa Landsat, desarrollado por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), constituye la serie de observación terrestre continua más larga de la historia, proporcionando imágenes satelitales desde 1972 hasta la actualidad. Las misiones Landsat 8 y Landsat 9, actualmente operativas, capturan imágenes multispectrales con una resolución espacial de 30 metros y una frecuencia de revisita de 16 días, características que las convierten en una fuente de datos idónea para el análisis multitemporal de ecosistemas (USGS, 2023).

Las imágenes Landsat han sido ampliamente utilizadas en estudios de monitoreo ambiental a nivel global debido a su acceso libre y gratuito, su amplio archivo histórico y su alta resolución espectral. Estas características permiten realizar comparaciones temporales precisas, identificar cambios en la cobertura terrestre y analizar la dinámica de los ecosistemas a lo largo del tiempo (Wulder et al., 2022).

En el contexto del monitoreo de incendios y recuperación vegetal, las imágenes Landsat permiten calcular índices espectrales como el NDVI antes y después de los eventos de quema, facilitando la evaluación cuantitativa del impacto ecológico y el seguimiento de los procesos de regeneración. Su resolución temporal de 16 días posibilita la construcción de series multitemporales que reflejan con precisión la dinámica de recuperación de la vegetación en ecosistemas de humedales altoandinos (Wulder et al., 2022).

En aplicaciones concretas para el territorio peruano, el INGEMMET (2022) ha destacado que el uso de imágenes Landsat en el monitoreo ambiental permite identificar con precisión la reducción de la cobertura vegetal posterior a incendios y hacer seguimiento

de los procesos de regeneración, facilitando el monitoreo continuo de áreas extensas con bajos costos operativos, lo que valida su uso como herramienta metodológica central en la presente investigación.

2.1.4.4. Procesamiento digital de imágenes satelitales

El procesamiento digital de imágenes satelitales constituye una etapa fundamental en el análisis de datos de teledetección, ya que permite transformar la información espectral bruta capturada por los sensores en datos interpretables para el monitoreo ambiental. Este proceso comprende una serie de correcciones y transformaciones que garantizan la precisión y comparabilidad de los datos obtenidos en diferentes fechas (Chuvienco, 2020).

La corrección radiométrica tiene como objetivo eliminar las distorsiones introducidas por el sensor y las condiciones de iluminación, estandarizando los valores digitales de la imagen para permitir comparaciones temporales confiables. La corrección atmosférica, por su parte, elimina los efectos de dispersión y absorción producidos por la atmósfera durante la adquisición de la imagen, convirtiendo los valores de radiancia en reflectancia de superficie, que es la magnitud física que refleja las propiedades reales de los objetos observados (Jensen, 2016).

La corrección geométrica garantiza la precisión espacial de las imágenes, asegurando que cada píxel corresponda correctamente a su ubicación en la superficie terrestre. Este proceso es especialmente importante en análisis multitemporales, donde la superposición precisa de imágenes de diferentes fechas es indispensable para detectar cambios en la cobertura vegetal (Chuvienco, 2020).

Una vez aplicadas las correcciones necesarias, las imágenes procesadas permiten calcular índices espectrales de vegetación con alta precisión. En el contexto de la presente investigación, el procesamiento digital de las imágenes Landsat siguió este protocolo de correcciones para garantizar la confiabilidad del análisis multitemporal del NDVI antes y durante los doce meses posteriores a los incendios registrados en los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca durante el año 2023 (USGS, 2023).

2.1.5. ÍNDICES DE VEGETACIÓN

2.1.5.1. Concepto y fundamentos del NDVI

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés *Normalized Difference Vegetation Index*) constituye uno de los indicadores espectrales más utilizados a nivel mundial para evaluar el estado, vigor y dinámica de la vegetación mediante el análisis de imágenes satelitales multiespectrales. Este índice se basa en la relación matemática entre la reflectancia en el rango del infrarrojo cercano (NIR) y la banda del rojo visible (RED), expresada mediante la siguiente fórmula:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

Donde NIR representa la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano y RED la reflectancia en la banda del rojo visible. El resultado es un valor adimensional que oscila entre -1 y +1, cuya magnitud permite cuantificar la actividad fotosintética y la densidad de biomasa vegetal de manera objetiva y reproducible (Pettorelli, 2021).

El fundamento físico del NDVI radica en el comportamiento espectral característico de la vegetación. Las plantas con alta actividad fotosintética presentan una fuerte absorción en la banda roja debido a la presencia de clorofila, y una alta reflectancia en el infrarrojo cercano determinada por la estructura interna de las células foliares. Esta diferencia espectral, amplificada mediante la normalización matemática del índice, permite distinguir con precisión la vegetación activa de otros tipos de cobertura terrestre como suelo desnudo, agua o superficies quemadas (Chuvieco, 2020).

Entre sus principales ventajas se encuentran su simplicidad de cálculo, su disponibilidad a partir de sensores satelitales de acceso libre como Landsat, su capacidad para realizar comparaciones temporales consistentes y su amplia validación científica en estudios ecológicos a escala global. Estas características lo convierten en una herramienta idónea para el monitoreo de ecosistemas de humedales altoandinos afectados por incendios antrópicos (Wulder et al., 2022).

2.1.5.2. Interpretación ecológica de los valores del NDVI

Los valores del NDVI permiten diferenciar distintos tipos de coberturas terrestres y niveles de vigor vegetal, constituyendo una escala de interpretación ecológica ampliamente validada en la literatura científica. La siguiente tabla resume los rangos de valores y su interpretación en el contexto de ecosistemas de humedales:

Tabla 01: Interpretación ecológica de valores de niveles de NDVI

Rango de NDVI	Interpretación ecológica
< 0	Superficies sin cobertura vegetal: agua, nieve, suelos saturados, áreas quemadas
0.00 – 0.19	Suelo desnudo, vegetación muy escasa o ausente, zonas post incendio severo
0.20 – 0.39	Vegetación dispersa, cobertura parcial, etapas tempranas de regeneración
0.40 – 0.59	Vegetación moderadamente densa, condiciones fisiológicas intermedias
0.60 – 0.79	Vegetación densa con alta actividad fotosintética
≥ 0.80	Vegetación muy densa y saludable, máxima actividad fotosintética

Fuente: Adaptado de Pettorelli (2021) y Chuvieco (2020).

En ecosistemas de totorales como los del lago Titicaca, los valores del NDVI varían significativamente en función de factores como el nivel del agua, la densidad de la vegetación, la disponibilidad de nutrientes y la ocurrencia de disturbios. En condiciones óptimas, los totorales presentan valores de NDVI superiores a 0.60, mientras que inmediatamente después de un incendio estos valores pueden reducirse hasta rangos

cercanos a cero o negativos, reflejando la pérdida total de biomasa aérea (Ferro Sihuín, 2024).

La interpretación temporal de estos valores resulta especialmente relevante en el contexto del monitoreo postincendio. Una disminución abrupta del índice indica la ocurrencia del disturbio, mientras que incrementos progresivos en los meses siguientes evidencian el proceso de regeneración y la recuperación de la actividad fotosintética de los totorales. Esta capacidad de reflejar la dinámica temporal de la vegetación convierte al NDVI en un indicador clave para evaluar la resiliencia ecológica de los humedales altoandinos (Pettorelli, 2021).

2.1.5.3. Aplicación del NDVI en la evaluación de incendios forestales

El NDVI se ha consolidado como uno de los indicadores más utilizados en la evaluación de incendios forestales debido a su capacidad para detectar cambios en la biomasa vegetal, la cobertura y la actividad fotosintética. Su aplicación permite identificar áreas afectadas por el fuego, estimar la severidad del daño y analizar los procesos de regeneración ecológica posteriores al evento (Chuvieco, 2020).

Cuando ocurre un incendio, la vegetación sufre una pérdida inmediata de biomasa aérea y una reducción significativa en su contenido de clorofila. Esta situación genera una disminución notable en la reflectancia del infrarrojo cercano y un aumento relativo en la reflectancia de la banda roja, traduciéndose en una caída abrupta de los valores del NDVI. Este comportamiento espectral permite delimitar con precisión las áreas quemadas mediante análisis comparativos de imágenes pre y postincendio, constituyendo una herramienta objetiva para la cuantificación del impacto (Lazo La Rosa, 2024).

La magnitud de la disminución del NDVI está directamente relacionada con la severidad del incendio. En eventos de alta intensidad, donde se produce una destrucción casi total de la cobertura vegetal, los valores del índice pueden reducirse hasta niveles cercanos a cero o incluso negativos. En cambio, incendios de menor intensidad generan descensos moderados del índice, reflejando daños parciales en la biomasa vegetal. Esta relación

entre severidad e índice espectral ha sido ampliamente validada en estudios recientes aplicados a diferentes tipos de ecosistemas (Ferro Sihuin, 2024).

El análisis multitemporal del NDVI constituye además una herramienta fundamental para el monitoreo de la recuperación post incendio. A lo largo del tiempo, el incremento progresivo de los valores del índice indica la regeneración de la vegetación, el restablecimiento de la actividad fotosintética y la recuperación de la biomasa. Este seguimiento temporal permite evaluar la resiliencia del ecosistema, determinar la velocidad de recuperación ecológica e identificar zonas con procesos de regeneración más lentos que requieren intervención de restauración (Wulder et al., 2022).

En ecosistemas de humedales como los totorales, el NDVI presenta especial relevancia debido a las características fisiológicas de la vegetación hidrófila. La elevada capacidad de regeneración de la totora gracias a su sistema rizomatoso se refleja en incrementos relativamente dinámicos del NDVI después de disturbios, lo que permite cuantificar con precisión los procesos de recuperación vegetal en estos ecosistemas mediante el análisis de series temporales de imágenes Landsat (Aponte et al., 2017).

2.1.5.4. Limitaciones del NDVI en el análisis post incendio

A pesar de su amplia utilización, el NDVI presenta ciertas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados en análisis post incendio. La primera es su tendencia a la saturación en áreas con alta densidad de vegetación, donde el índice alcanza valores cercanos a su máximo y pierde sensibilidad para detectar cambios adicionales en la cobertura vegetal. Esta situación puede dificultar la evaluación de la severidad del incendio en zonas donde la vegetación previa presentaba una gran densidad, como ocurre en totorales compactos (Pettorelli, 2021).

La influencia del sustrato expuesto representa otra limitación importante. Después de un incendio, la pérdida de cobertura vegetal deja al descubierto superficies de sedimento, cenizas o material orgánico quemado, lo que altera la reflectancia espectral y puede generar valores de NDVI que no reflejan con precisión la condición real de regeneración

de la vegetación, efecto particularmente relevante en humedales donde las características del sustrato varían significativamente (Chuvieco, 2020).

Las condiciones atmosféricas constituyen también una fuente de error en el cálculo del NDVI. La presencia de nubes, aerosoles y vapor de agua puede modificar la señal espectral registrada por los sensores satelitales, afectando la comparabilidad de los valores entre diferentes fechas. Por ello, resulta indispensable aplicar procesos de corrección atmosférica para garantizar la confiabilidad del análisis multitemporal (Jensen, 2016).

Asimismo, el NDVI no permite identificar cambios en la composición de especies ni en la estructura interna del ecosistema, ya que refleja principalmente el estado fisiológico general y la densidad de la cobertura vegetal. En el contexto de estudios postincendio, esto implica que el índice puede mostrar una recuperación aparente de la vegetación sin reflejar necesariamente la restauración completa de las funciones ecológicas del sistema (Wulder et al., 2022).

Finalmente, la resolución espacial de 30 metros de las imágenes Landsat puede limitar la precisión del análisis en ecosistemas heterogéneos o fragmentados. En el caso de los totorales del lago Titicaca, donde existen parches de vegetación intercalados con áreas de agua libre, la mezcla espectral dentro de un mismo píxel puede afectar la exactitud de los valores del NDVI, aspecto que debe considerarse en la interpretación de los resultados (USGS, 2023).

2.1.6. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN Y SUS DIMENSIONES

La presente investigación se estructura en torno a dos variables principales cuya relación determina el análisis del impacto de los incendios antrópicos sobre los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca. A continuación, se presenta la fundamentación teórica de cada variable y sus respectivas dimensiones.

2.1.6.1. Variable 1: Variación del NDVI

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) constituye la variable independiente de la presente investigación, entendida como el indicador espectral que

permite cuantificar objetivamente los cambios en la actividad fotosintética y la biomasa vegetal de los totorales antes y después de la ocurrencia de incendios antrópicos. Su variación temporal constituye el elemento central del análisis multitemporal desarrollado en este estudio (Pettorelli, 2021).

Dimensión 1: Valores NDVI pre-incendio

Esta dimensión comprende los valores del índice registrados mediante imágenes satelitales Landsat durante el mes previo a la ocurrencia del incendio, constituyendo la línea base o condición de referencia del ecosistema en estado no perturbado. Estos valores permiten caracterizar el estado inicial de la cobertura vegetal de los totorales, estableciendo el punto de comparación a partir del cual se cuantifica el impacto del disturbio. De acuerdo con Wulder et al. (2022), la determinación de una línea base confiable es fundamental para la validez de cualquier análisis multitemporal de cambio en la cobertura vegetal, ya que permite aislar el efecto del disturbio de las variaciones estacionales naturales del ecosistema.

En los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca, los valores NDVI pre-incendio en condiciones óptimas se ubican generalmente en rangos superiores a 0.60, reflejando la alta densidad y actividad fotosintética característica de esta especie en su estado natural. Estos valores constituyen el parámetro de referencia para evaluar la magnitud del impacto y el grado de recuperación alcanzado durante el periodo de análisis (Ferro Sihuin, 2024).

Dimensión 2: Valores NDVI post-incendio

Esta dimensión abarca los valores del NDVI registrados durante los doce meses posteriores a la ocurrencia del incendio, permitiendo cuantificar tanto el impacto inmediato del disturbio como la evolución temporal de la recuperación vegetal. La comparación sistemática de estos valores con la línea base pre-incendio posibilita determinar la magnitud de la pérdida de cobertura vegetal y evaluar la trayectoria de regeneración del ecosistema a lo largo del periodo de análisis (Chuvienco, 2020).

Inmediatamente después del incendio, los valores del NDVI experimentan una caída abrupta hacia rangos cercanos a cero o negativos, reflejando la destrucción de la biomasa aérea y la reducción drástica de la actividad fotosintética. Conforme avanza el proceso de regeneración, estos valores se incrementan progresivamente, proporcionando información cuantitativa sobre la velocidad y el grado de recuperación de la cobertura vegetal en las áreas afectadas (Lazo La Rosa, 2024).

Dimensión 3: Análisis multitemporal del NDVI

Esta dimensión integra la comparación sistemática de los valores del NDVI a lo largo de toda la serie temporal del estudio, desde el periodo pre-incendio hasta los doce meses posteriores al evento. El análisis multitemporal permite identificar patrones de cambio en la cobertura vegetal, determinar la tasa de recuperación ecológica y establecer comparaciones entre las zonas afectadas por incendios y las zonas de referencia no perturbadas dentro del mismo ecosistema (Wulder et al., 2022).

Este enfoque constituye una metodología ampliamente validada en estudios de monitoreo postincendio a nivel global, ya que permite no solo cuantificar el impacto del disturbio sino también evaluar la resiliencia ecológica del sistema y determinar si el ecosistema alcanza sus condiciones previas al incendio dentro del periodo de análisis. En ecosistemas de humedales altoandinos, este análisis adquiere especial relevancia dado que la dinámica de recuperación de la totora está influenciada por factores hidrológicos, climáticos y biológicos interrelacionados que se expresan a lo largo del tiempo (Fluet-Chouinard et al., 2023).

2.1.6.2. Variable 2: Recuperación de la cobertura vegetal de los totorales

La recuperación de la cobertura vegetal de los totorales constituye la variable dependiente de la presente investigación, entendida como el proceso ecológico mediante el cual los totorales afectados por incendios antrópicos restablecen progresivamente su biomasa, densidad y actividad fotosintética a lo largo del tiempo posterior al disturbio. Esta variable refleja la resiliencia ecológica del ecosistema y su capacidad para retornar a condiciones similares a las previas al incendio (Mitsch & Gosselink, 2015).

Dimensión 1: Tasa de recuperación vegetal

La tasa de recuperación vegetal se define como la velocidad con la que los valores del NDVI se incrementan desde el punto mínimo registrado inmediatamente después del incendio hasta los niveles característicos del estado pre-disturbio. Esta dimensión permite cuantificar el ritmo de regeneración ecológica de los totorales, identificando los periodos de mayor actividad de rebrote y los momentos en que la recuperación se estabiliza o desacelera (Pettorelli, 2021).

La tasa de recuperación está determinada por múltiples factores ambientales, incluyendo la disponibilidad hídrica, la concentración de nutrientes en el sedimento, las condiciones climáticas y la severidad del incendio. En los totorales del lago Titicaca, la capacidad de rebrote a partir de rizomas subterráneos favorece tasas de recuperación relativamente dinámicas en condiciones hidrológicas adecuadas, aunque eventos de sequía como el registrado en 2023 pueden ralentizar significativamente este proceso (SENAMHI, 2023).

Dimensión 2: Fases de regeneración ecológica

Esta dimensión comprende la caracterización de las etapas sucesivas mediante las cuales los totorales afectados por incendios progresan desde la condición de máximo impacto hasta la recuperación de sus funciones ecológicas. Cada fase se identifica mediante rangos específicos de valores del NDVI que reflejan el estado fisiológico de la vegetación en un momento determinado del proceso de regeneración (Aponte et al., 2017).

La fase inicial, correspondiente al periodo inmediato postincendio, se caracteriza por valores mínimos del NDVI asociados a la pérdida total de biomasa aérea y la exposición del sustrato. La fase de rebrote temprano se identifica por incrementos iniciales del índice derivados de la emergencia de nuevos brotes desde rizomas sobrevivientes. La fase de crecimiento activo refleja un incremento sostenido de los valores del NDVI asociado al desarrollo progresivo de la cobertura vegetal. Finalmente, la fase de estabilización corresponde al periodo en que los valores del índice se aproximan a los registrados en la

condición pre-incendio, indicando la recuperación sustancial de las funciones ecológicas del ecosistema (Chambers et al., 2021).

Dimensión 3: Comparación entre zona afectada y zona de referencia

Esta dimensión establece la comparación sistemática entre los valores del NDVI registrados en las áreas directamente afectadas por los incendios y aquellos correspondientes a zonas de referencia no perturbadas dentro del mismo ecosistema. Este análisis comparativo permite aislar el efecto específico del incendio sobre la cobertura vegetal, eliminando la influencia de las variaciones estacionales naturales y otros factores ambientales que afectan por igual a todo el ecosistema (Wulder et al., 2022).

Las zonas de referencia seleccionadas para la presente investigación corresponden a sectores de totorales dentro de la Reserva Nacional del Titicaca que no fueron afectados por incendios durante el periodo de análisis, presentando condiciones ecológicas e hidrológicas similares a las de las zonas perturbadas. La diferencia entre los valores del NDVI de ambas zonas a lo largo del tiempo constituye un indicador preciso del impacto relativo del incendio y del grado de recuperación alcanzado por el ecosistema en cada momento del periodo de monitoreo (SERNANP, 2023).

Esta comparación permite además determinar si la recuperación observada en las zonas afectadas representa una regeneración real del ecosistema o simplemente una respuesta estacional de la vegetación, proporcionando una base metodológica sólida para la interpretación de los resultados del análisis multitemporal del NDVI (Ferro Sihuin, 2024).

2.2. MARCO CONCEPTUAL

El marco conceptual presenta y define los términos fundamentales que estructuran la presente investigación, estableciendo la base conceptual que articula las variables de estudio, sus dimensiones y los procesos ecológicos involucrados en el análisis de la variación del NDVI en los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca afectados por incendios antrópicos.

Análisis multitemporal

Metodología de procesamiento de imágenes satelitales que consiste en la comparación sistemática de datos obtenidos en diferentes fechas con el objetivo de identificar y cuantificar cambios en la cobertura terrestre a lo largo del tiempo. En el contexto de la presente investigación, el análisis multitemporal permite evaluar la variación del NDVI desde el periodo previo al incendio hasta los doce meses posteriores al evento, facilitando la caracterización de la dinámica de recuperación vegetal de los totorales afectados (Wulder et al., 2022).

Biomasa vegetal

Cantidad total de materia orgánica producida por la vegetación en un área determinada, expresada generalmente en unidades de masa por unidad de superficie. En los totorales, la biomasa comprende tanto la parte aérea —tallos, hojas e inflorescencias— como la subterránea —rizomas y raíces—. Los incendios antrópicos destruyen casi en su totalidad la biomasa aérea, generando una reducción abrupta en los valores del NDVI que puede ser detectada y cuantificada mediante imágenes satelitales Landsat (Fluet-Chouinard et al., 2023).

Cobertura vegetal

Proporción de la superficie del suelo cubierta por vegetación en un área determinada, expresada como porcentaje o fracción. En la presente investigación, la cobertura vegetal de los totorales constituye el indicador ecológico central cuya variación es evaluada mediante el NDVI antes y después de la ocurrencia de incendios. La pérdida y recuperación de cobertura vegetal determinan la dinámica temporal del índice y reflejan el estado de resiliencia ecológica del humedal (SERNANP, 2023).

Disturbio antrópico

Evento ocasionado por actividades humanas que genera alteraciones en la estructura, composición o funcionamiento de un ecosistema. En los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca, los incendios de origen antrópico constituyen el principal disturbio evaluado en esta investigación, generados por prácticas de quema no controlada para renovación

de pastizales o limpieza de vegetación. Estos eventos producen impactos severos sobre la cobertura vegetal, la biodiversidad acuática y los servicios ecosistémicos del humedal (SERNANP, 2020).

Ecosistema de humedal altoandino

Sistema ecológico de transición entre ambientes terrestres y acuáticos, ubicado en regiones de alta montaña generalmente por encima de los 3 000 m s.n.m., caracterizado por la presencia permanente o temporal de agua superficial o subsuperficial y condiciones climáticas extremas de baja temperatura, alta radiación solar y alta amplitud térmica. La Reserva Nacional del Titicaca constituye un humedal altoandino de alta relevancia ecológica, cuya vegetación emergente dominada por totorales cumple funciones esenciales de regulación hídrica, almacenamiento de carbono y provisión de hábitat para la biodiversidad regional (Ramsar Convention Secretariat, 2016).

Firma espectral

Patrón característico de reflectancia de un material u objeto en función de las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, que permite su identificación y diferenciación mediante sensores remotos. La vegetación activa, como los totorales en condiciones óptimas, presenta una firma espectral caracterizada por alta absorción en la banda roja y alta reflectancia en el infrarrojo cercano. Esta propiedad espectral es la base del cálculo del NDVI y permite distinguir la vegetación sana de las áreas quemadas o degradadas (Chuvieco, 2020).

Imágenes satelitales Landsat

Datos de observación terrestre obtenidos por los satélites del programa Landsat, desarrollado por la NASA y el USGS, que proporcionan imágenes multiespectrales con una resolución espacial de 30 metros y una frecuencia de revisita de 16 días. En la presente investigación, las imágenes Landsat 8 y Landsat 9 constituyen la fuente primaria de datos para el cálculo del NDVI y el análisis multitemporal de la cobertura vegetal de los totorales antes y después de los incendios del año 2023 (USGS, 2023).

Incendio forestal antrópico

Evento de combustión no controlada de vegetación originado por actividades humanas, que genera la destrucción de la biomasa vegetal y produce impactos severos sobre la estructura y funcionalidad de los ecosistemas. En los humedales del lago Titicaca, los incendios antrópicos en totorales están asociados principalmente a prácticas de quema para renovación de pastizales y a condiciones de sequía que incrementan la inflamabilidad de la vegetación senescente. Más del 90% de los incendios en humedales a nivel global tienen origen antrópico (Ramsar Convention Secretariat, 2016).

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Indicador espectral adimensional calculado a partir de la diferencia normalizada entre la reflectancia en el infrarrojo cercano y la banda roja del espectro electromagnético, expresado mediante la fórmula $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$. Sus valores oscilan entre -1 y +1, donde valores cercanos a 1 indican vegetación densa y saludable, valores cercanos a 0 corresponden a suelo desnudo o vegetación muy escasa, y valores negativos representan superficies de agua, nieve o áreas quemadas. En la presente investigación, el NDVI constituye la variable principal para evaluar el impacto de los incendios y la recuperación de los totorales (Pettorelli, 2021).

Macrófita emergente

Planta acuática de gran porte cuya parte vegetativa aérea se desarrolla por encima de la superficie del agua, mientras que su sistema radicular permanece sumergido o anclado en el sustrato. La totora (*Schoenoplectus californicus* subsp. *tatora*) es la macrófita emergente dominante en los totorales del lago Titicaca, cuya alta capacidad de regeneración vegetativa a partir de rizomas subterráneos le confiere una notable resiliencia frente a disturbios como los incendios (Chambers et al., 2021).

Monitoreo ambiental

Proceso sistemático y continuo de observación, medición y evaluación de las condiciones de un ecosistema a lo largo del tiempo, con el propósito de detectar cambios, identificar tendencias y apoyar la toma de decisiones en la gestión ambiental. En la presente

investigación, el monitoreo ambiental de los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca se realiza mediante el análisis multitemporal del NDVI derivado de imágenes satelitales Landsat, permitiendo superar las limitaciones logísticas del monitoreo tradicional de campo (INGEMMET, 2022).

Recuperación ecológica postincendio

Proceso mediante el cual un ecosistema perturbado por un incendio restablece progresivamente su estructura, composición y funcionalidad a través de mecanismos de regeneración vegetal y restauración de procesos ecológicos. En los totorales, este proceso se inicia con el rebrote de rizomas sobrevivientes y avanza a través de fases sucesivas de crecimiento hasta alcanzar condiciones similares a las previas al disturbio. La velocidad y el grado de recuperación dependen de la severidad del incendio, las condiciones hidrológicas y climáticas, y la disponibilidad de nutrientes en el sedimento (Aponte et al., 2017).

Reflectancia

Fracción de la radiación electromagnética incidente sobre una superficie que es reflejada por esta sin ser absorbida ni transmitida. En teledetección, la reflectancia de superficie es la magnitud física que se obtiene tras aplicar correcciones atmosféricas a las imágenes satelitales, representando la propiedad real de los objetos observados independientemente de las condiciones de iluminación. Los cambios en la reflectancia de la vegetación en las bandas roja e infrarroja cercana, ocasionados por incendios, son la base para el cálculo y la interpretación del NDVI en la presente investigación (Jensen, 2016).

Reserva Nacional del Titicaca

Área natural protegida establecida en 1978, ubicada en el departamento de Puno, Perú, en las orillas del lago Titicaca a una altitud aproximada de 3 810 m s.n.m. Abarca una superficie de 36 180 hectáreas divididas en dos sectores: Ramis y Puno. Alberga extensas formaciones de totorales que constituyen el principal ecosistema de la reserva, cumpliendo funciones ecológicas esenciales y sustentando la biodiversidad acuática y las

actividades tradicionales de las comunidades locales. La ocurrencia de incendios antrópicos en sus totorales representa actualmente una de las principales amenazas para su conservación (SERNANP, 2023).

Resiliencia ecológica

Capacidad de un ecosistema para resistir perturbaciones y recuperar su estructura, composición y funciones ecológicas originales después de un disturbio. En los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca, la resiliencia ecológica frente a incendios antrópicos está determinada principalmente por la capacidad de regeneración vegetativa de la totora a partir de rizomas subterráneos, y se evalúa en la presente investigación mediante el análisis de la trayectoria de recuperación de los valores del NDVI a lo largo del periodo postincendio (Chambers et al., 2021).

Severidad del incendio

Grado de daño ecológico producido por un incendio sobre la vegetación, el suelo y los procesos biogeoquímicos de un ecosistema. En los totorales, la severidad determina directamente la magnitud de la disminución del NDVI inmediatamente después del evento y condiciona la velocidad del proceso de recuperación ecológica. Incendios de alta severidad generan reducciones más pronunciadas del índice y procesos de recuperación más lentos, mientras que eventos de baja severidad permiten una regeneración más rápida a partir de rizomas intactos (Lazo La Rosa, 2024).

Teledetección

Conjunto de técnicas y métodos que permiten obtener información sobre la superficie terrestre mediante sensores instalados en plataformas aéreas o satelitales, sin necesidad de contacto directo con los objetos de estudio. Se basa en el registro y análisis de la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre en diferentes longitudes de onda. En la presente investigación, la teledetección mediante imágenes satelitales Landsat constituye la herramienta metodológica principal para el monitoreo de la cobertura vegetal de los totorales y la evaluación del impacto de los incendios antrópicos (Chuvieco, 2020).

Totalal

Formación vegetal dominada por totora (*Schoenoplectus californicus* subsp. *tatora*), constituida por extensas colonias de esta macrófita emergente que se desarrollan en zonas litorales poco profundas de los lagos y humedales altoandinos. En la Reserva Nacional del Titicaca, los totorales representan el ecosistema más importante de la reserva, proveyendo hábitat para la biodiversidad acuática, sustentando actividades tradicionales de las comunidades locales y cumpliendo funciones ecológicas clave de regulación hidrológica, almacenamiento de carbono y estabilización del sustrato lacustre (SERNANP, 2020).

2.3. MARCO LEGAL

El presente marco legal sistematiza las principales disposiciones normativas del ordenamiento jurídico peruano e internacional que regulan la conservación de áreas naturales protegidas, la gestión de humedales, la prevención de incendios forestales y el uso de tecnologías de teledetección para el monitoreo ambiental, constituyendo el sustento legal de la presente investigación.

2.3.1. NORMATIVA INTERNACIONAL

Convención Ramsar sobre los Humedales (1971)

La Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional, conocida como la Convención Ramsar, constituye el principal instrumento intergubernamental de alcance mundial para la conservación y el uso racional de los humedales. El Perú es Estado Parte de esta convención desde 1992, asumiendo el compromiso de conservar los humedales incluidos en la Lista Ramsar y promover su uso sostenible. El lago Titicaca y la Reserva Nacional del Titicaca están comprendidos dentro de los humedales de importancia internacional reconocidos por esta convención, lo que implica la obligación del Estado peruano de garantizar su conservación, monitorear su estado ecológico y adoptar medidas frente a perturbaciones como los incendios antrópicos que afectan sus totorales (Ramsar Convention Secretariat, 2016).

Agenda 2030 y Objetivos de Desarrollo Sostenible — ODS 15

El Objetivo de Desarrollo Sostenible N.º 15, adoptado por las Naciones Unidas en 2015, establece la meta de proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y frenar la pérdida de biodiversidad. En el contexto de la presente investigación, el monitoreo de la recuperación vegetal de los totorales mediante el NDVI contribuye directamente al cumplimiento de este objetivo, aportando información científica para la gestión sostenible de uno de los humedales altoandinos más importantes de América del Sur (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2015).

2.3.2. NORMATIVA NACIONAL

Constitución Política del Perú (1993)

El artículo 68º de la Constitución Política del Perú establece la obligación del Estado de promover la conservación de la diversidad biológica y de las áreas naturales protegidas. Asimismo, el artículo 67º dispone que el Estado determina la política nacional del ambiente y promueve el uso sostenible de sus recursos naturales. Estas disposiciones constitucionales sustentan la necesidad de implementar herramientas de monitoreo ambiental, como el análisis multitemporal del NDVI, para evaluar el estado de conservación de los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca frente a disturbios antrópicos (Congreso Constituyente Democrático, 1993).

Ley N.º 26834 — Ley de Áreas Naturales Protegidas (1997)

Esta ley establece el marco normativo para la gestión y conservación de las áreas naturales protegidas del Perú, incluyendo las reservas nacionales. El artículo 2º define las áreas naturales protegidas como espacios continentales o marinos del territorio nacional reconocidos, establecidos y protegidos legalmente por el Estado, con la finalidad de conservar la diversidad biológica y demás valores naturales y culturales asociados. La Reserva Nacional del Titicaca, como área natural protegida bajo administración del SERNANP, está sujeta a esta norma, la cual sustenta la necesidad de monitorear y

evaluar el impacto de los incendios antrópicos sobre sus totorales mediante herramientas científicas como la teledetección satelital (Congreso de la República del Perú, 1997).

Ley N.° 28611 — Ley General del Ambiente (2005)

La Ley General del Ambiente constituye el marco normativo general para la gestión ambiental en el Perú. El artículo 99° establece la obligación del Estado de promover el manejo integrado y el monitoreo de los ecosistemas frágiles, entre los cuales se incluyen los humedales altoandinos. Asimismo, el artículo 101° reconoce los humedales como ecosistemas de especial importancia ecológica que deben ser objeto de conservación y manejo sostenible. En este contexto, la presente investigación se enmarca en el cumplimiento de estas disposiciones al generar información científica sobre el estado de los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca mediante el análisis del NDVI (Congreso de la República del Perú, 2005).

Ley N.° 29763 — Ley Forestal y de Fauna Silvestre (2011) y su Reglamento (D.S. N.° 018-2015-MINAGRI)

Esta ley regula el aprovechamiento sostenible, la conservación, la protección y el control de los recursos forestales y de fauna silvestre del país. El artículo 120° establece disposiciones específicas para la prevención y control de incendios forestales, señalando la responsabilidad del Estado en el monitoreo de eventos de incendio y la adopción de medidas de restauración ecológica en áreas afectadas. Su reglamento precisa los instrumentos de monitoreo y evaluación que deben implementarse en zonas afectadas por incendios, lo que respalda directamente el enfoque metodológico de la presente investigación basado en el análisis multitemporal del NDVI (Congreso de la República del Perú, 2011).

Decreto Supremo N.° 012-2009-MINAM — Política Nacional del Ambiente

La Política Nacional del Ambiente establece los lineamientos, objetivos, estrategias e instrumentos de aplicación de la política ambiental del Estado peruano. En su eje de política 2, referido a la gestión integral de la calidad ambiental, se establece la necesidad de implementar sistemas de información y monitoreo ambiental que permitan evaluar el

estado de los ecosistemas y apoyar la toma de decisiones. Esta disposición sustenta el uso de herramientas de teledetección como el NDVI para el monitoreo de la cobertura vegetal en áreas naturales protegidas (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2009).

Decreto Supremo N.° 023-2021-MINAM — Política Nacional del Ambiente al 2030

Este instrumento de política establece los objetivos y lineamientos del Estado peruano en materia ambiental para el periodo 2021-2030, en concordancia con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Entre sus lineamientos prioritarios se incluye la conservación y restauración de ecosistemas degradados, así como la implementación de sistemas de monitoreo ambiental basados en tecnología para la gestión sostenible de los recursos naturales. La presente investigación se alinea con estos lineamientos al aportar información científica sobre la dinámica de recuperación vegetal de los totorales mediante el análisis del NDVI (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2021).

Decreto Supremo N.° 008-2014-MINAGRI — Plan Nacional de Prevención y Control de Incendios Forestales

Este decreto establece el marco estratégico para la prevención, detección temprana, control y restauración de áreas afectadas por incendios forestales en el Perú. Reconoce la importancia del monitoreo satelital como herramienta fundamental para la detección de incendios y la evaluación de su impacto sobre la cobertura vegetal, respaldando el uso de índices espectrales como el NDVI en estudios de evaluación postincendio. Sus lineamientos son directamente aplicables a la situación de los incendios antrópicos en los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca (Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI], 2014).

2.3.3. INSTRUMENTOS DE GESTIÓN DE LA RESERVA NACIONAL DEL TITICACA

Plan Maestro de la Reserva Nacional del Titicaca 2020–2025

El Plan Maestro constituye el principal instrumento de planificación y gestión de la Reserva Nacional del Titicaca, aprobado por el SERNANP. Identifica los incendios antrópicos en los totorales como una de las principales amenazas para la conservación del ecosistema y establece lineamientos para su prevención, control y monitoreo.

Asimismo, reconoce la necesidad de implementar metodologías de evaluación del impacto ambiental basadas en herramientas tecnológicas de teledetección, lo que respalda directamente los objetivos y la metodología de la presente investigación (SERNANP, 2020).

2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

La aplicación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat permite detectar, analizar y monitorear de manera significativa el proceso de recuperación de la cobertura vegetal de las áreas de totora afectadas por incendios antrópicos en la Reserva Nacional del Titicaca durante el año 2023, evidenciándose una disminución significativa del índice inmediatamente después del evento y una recuperación progresiva durante los doce meses posteriores al incendio.

2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- La variación de los valores del NDVI entre el periodo previo al incendio y el periodo inmediato posterior evidencia una disminución estadísticamente significativa en las zonas de totorales afectadas por incendios antrópicos en la Reserva Nacional del Titicaca durante el año 2023.
- Existen diferencias estadísticamente significativas en los valores del NDVI entre las zonas de totorales impactadas por incendios antrópicos y las zonas de referencia no afectadas dentro de la Reserva Nacional del Titicaca durante el periodo de análisis.
- La evolución temporal del NDVI en las áreas de totorales incendiadas durante los doce meses posteriores al evento refleja un proceso de recuperación vegetal progresivo y cuantificable, aunque sin alcanzar completamente los valores registrados en el periodo previo al incendio dentro del periodo de análisis.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO

La presente investigación se desarrolló en la Reserva Nacional del Titicaca (RNT), área natural protegida ubicada en el departamento de Puno, región Puno, Perú, en las orillas del lago Titicaca a una altitud de 3 810 m s.n.m. La reserva fue establecida el 31 de octubre de 1978 mediante Decreto Supremo N.° 185-78-AA y abarca una superficie total de 36 180 hectáreas distribuidas en dos sectores: el sector Ramis, ubicado en la provincia de Huancané, y el sector Puno, localizado en la provincia de Puno (SERNANP, 2023).

Geográficamente, la reserva se ubica entre las coordenadas 15°09' y 16°05' de latitud sur, y 69°35' y 70°12' de longitud oeste. El área de estudio corresponde específicamente a los totorales del sector Puno, donde se concentran las principales formaciones de *Schoenoplectus californicus* subsp. *tatora* y donde se registraron los eventos de incendio antrópico durante el año 2023 objeto de la presente investigación.

Desde el punto de vista climático, la zona se caracteriza por un clima frío y semiárido, típico del altiplano puneño, con temperaturas medias anuales que oscilan entre 7 °C y 10 °C, precipitaciones concentradas en el periodo noviembre-marzo y una marcada estación seca entre mayo y agosto. Durante el año 2023, la región experimentó un déficit hídrico histórico del 49% en la precipitación acumulada, determinando que el 84% de los totorales de las áreas protegidas se encontraran en condiciones de sequía extrema, lo que incrementó significativamente la vulnerabilidad de la vegetación frente a los incendios antrópicos (SENAMHI, 2023).

Ecológicamente, la reserva alberga extensas formaciones de totorales que constituyen el ecosistema dominante del área protegida, cumpliendo funciones ecológicas esenciales de regulación hídrica, almacenamiento de carbono, estabilización del sustrato lacustre y provisión de hábitat para la biodiversidad acuática regional.

3.1.1. DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS DE ANÁLISIS

Para el desarrollo del análisis multitemporal del NDVI se identificaron y delimitaron tres zonas de análisis dentro del sector Puno de la Reserva Nacional del Titicaca, correspondientes a dos áreas afectadas por incendios antrópicos durante el año 2023 y una zona de referencia no perturbada. La ubicación de cada zona fue determinada a partir de los reportes institucionales del SERNANP (2023) y el COEN (2023), y verificada mediante análisis visual de imágenes satelitales Landsat en la plataforma Google Earth Engine.

Zona A — Área quemada dentro de la Reserva Nacional del Titicaca: Corresponde al área de totorales ubicada al interior del ámbito de la Reserva Nacional del Titicaca (sector de la reserva propiamente dicha), con punto de referencia en las coordenadas 15°43'38"S, 69°59'48"W (latitud: -15.7277, longitud: -69.8194). Esta zona presentó registro confirmado de incendio antrópico durante el año 2023, con una reducción drástica del NDVI inmediatamente después del evento, evidenciando el mayor nivel de afectación vegetal registrado en el estudio. Los totorales de esta zona presentaban condiciones de sequía extrema previas al incendio, asociadas al descenso histórico del nivel del lago Titicaca registrado en 2023.

Zona B — Área quemada en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional del Titicaca: Corresponde al área de totorales ubicada en la zona de amortiguamiento de la RNT, con punto de referencia en las coordenadas 15°51'38"S, 69°59'48"W (latitud: -15.8606, longitud: -69.9967). Esta zona también registró eventos de incendio antrópico durante el año 2023; sin embargo, la respuesta espectral observada sugiere una menor intensidad del impacto inicial en comparación con la Zona A, posiblemente asociada a diferencias en la densidad vegetal y las condiciones hidrológicas locales.

Zona C — Área de referencia no perturbada: Constituye la zona de control del análisis, conformada por sectores de totorales dentro del mismo ecosistema que no registraron eventos de incendio durante el periodo de análisis. Esta zona fue seleccionada por presentar condiciones ecológicas comparables a las zonas afectadas en términos de densidad vegetal, profundidad hídrica y exposición, con el propósito de controlar las variaciones estacionales naturales del NDVI y aislar el efecto específico del disturbio sobre la cobertura vegetal.

La ubicación georeferenciada de las tres zonas de análisis se presenta en la Figura 01, elaborada a partir del procesamiento de imágenes satelitales Landsat en la plataforma Google Earth Engine.



Figura 01: Mapa de ubicación de las zonas de análisis (Zona A, Zona B y Zona C) en el sector Puno de la Reserva Nacional del Titicaca. Fuente: Google Earth Engine / Landsat, elaboración propia.

Tabla 02: Caracterización de las zonas de análisis del estudio

Zona	Descripción	Latitud	Longitud	Estado
Zona A	Área quemada – interior RNT	-15.7277	-69.8194	Afectada por incendio 2023
Zona B	Área quemada – zona amortiguamiento RNT	-15.8606	-69.9967	Afectada por incendio 2023
Zona C	Área de referencia no perturbada	—	—	Sin registro de incendio

Fuente: SERNANP (2023), COEN (2023), elaboración propia.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. POBLACIÓN

La población de estudio estuvo constituida por la totalidad de la cobertura vegetal de totorales (*Schoenoplectus californicus* subsp. *tatora*) presentes en el sector Puno de la Reserva Nacional del Titicaca, abarcando una superficie aproximada de 7 030 hectáreas de vegetación emergente registrada en el Plan Maestro de la reserva (SERNANP, 2023). Esta población incluye tanto las áreas de totorales afectadas por los incendios antrópicos ocurridos durante el año 2023 como las zonas de referencia no perturbadas utilizadas como control en el análisis comparativo.

3.2.2. MUESTRA

La muestra estuvo conformada por las tres zonas de análisis delimitadas dentro del sector Puno de la Reserva Nacional del Titicaca: la Zona A (área quemada al interior de la reserva), la Zona B (área quemada en la zona de amortiguamiento) y la Zona C (zona de referencia no perturbada). El tipo de muestreo aplicado fue no probabilístico intencional, dado que la selección de las unidades de análisis respondió a criterios técnicos específicos: la ocurrencia verificada de incendios antrópicos durante el año

2023, la disponibilidad de imágenes satelitales Landsat sin cobertura nubosa superior al 20% para todas las fechas del periodo de análisis, y la presencia de zonas de referencia con condiciones ecológicas comparables en el área de influencia inmediata.

Para cada área de incendio identificada se delimitó un polígono de interés en la plataforma Google Earth Engine, sobre el cual se extrajeron los valores medios del NDVI en cada fecha de análisis. La Zona C fue seleccionada dentro del mismo ecosistema con características ecológicas similares, a fin de controlar las variaciones estacionales naturales del índice y aislar el efecto específico del disturbio sobre la cobertura vegetal.

3.3. MÉTODO Y TÉCNICAS

3.3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación corresponde a un enfoque cuantitativo de tipo aplicado, orientado a generar información científica que contribuya directamente a la gestión y conservación de los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca. El nivel de investigación es descriptivo-comparativo, dado que se describe la variación temporal del NDVI antes y después de los incendios y se establecen comparaciones entre las zonas afectadas (Zona A y Zona B) y la zona de referencia no perturbada (Zona C) (Manual UPSC, versión 3.1, 2024).

3.3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño de la investigación es no experimental longitudinal, dado que no se manipulan las variables de estudio y los datos se recopilan en múltiples momentos temporales a lo largo del periodo de análisis, comprendido entre un mes previo al incendio y los doce meses posteriores al evento. Este diseño permite analizar los cambios en los valores del NDVI a lo largo del tiempo, caracterizar la dinámica de recuperación vegetal y establecer comparaciones temporales sistemáticas entre las zonas afectadas y la zona de referencia (Wulder et al., 2022).

3.3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La técnica principal empleada en la presente investigación fue el análisis de teledetección satelital mediante el procesamiento digital de imágenes multiespectrales. Los datos

primarios consistieron en imágenes satelitales Landsat 8 y Landsat 9 de Nivel 2 (con corrección atmosférica aplicada por el USGS), obtenidas de forma gratuita a través del portal Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2023), correspondientes al periodo de análisis establecido.

Como instrumento principal se utilizó la plataforma Google Earth Engine (GEE), herramienta de procesamiento geoespacial en la nube que permitió la descarga, preprocesamiento, cálculo del NDVI y extracción de valores medios por zona para las series temporales de imágenes satelitales. Complementariamente, se empleó el software QGIS para la visualización cartográfica y delimitación de las áreas de estudio, y el software estadístico R para el análisis de las diferencias significativas entre los valores del NDVI en las distintas etapas del periodo de análisis.

Los criterios de selección de las imágenes satelitales fueron: cobertura nubosa inferior al 20% sobre el área de estudio; pertenencia al periodo de análisis establecido (un mes preincendio y doce meses post incendio); y disponibilidad de imágenes en la colección Landsat Collection 2, con corrección radiométrica y atmosférica de nivel 2 aplicada por el USGS (USGS, 2023).

Tabla 03: Fechas de las imágenes satelitales Landsat utilizadas en el análisis multitemporal

Periodo	Fecha de imagen	Mes de análisis	Satélite
Preincendio	24/05/2023	Mes 0 (referencia)	Landsat 8/9
post incendio – mes 1	09/06/2023	Mes 1	Landsat 8/9
post incendio – mes 2	19/07/2023	Mes 2	Landsat 8/9
post incendio – mes 3	20/08/2023	Mes 3	Landsat 8/9
post incendio – mes 4	13/09/2023	Mes 4	Landsat 8/9
post incendio – mes 5	07/10/2023	Mes 5	Landsat 8/9
post incendio – mes 6	16/11/2023	Mes 6	Landsat 8/9
post incendio – mes 11	16/04/2024	Mes 11	Landsat 8/9
post incendio – mes 12	26/05/2024	Mes 12	Landsat 8/9
post incendio – mes 13	27/06/2024	Mes 13	Landsat 8/9
post incendio – mes 14	21/07/2024	Mes 14	Landsat 8/9

Fuente: USGS Earth Explorer (2023-2024), elaboración propia.

3.4. DISEÑO METODOLÓGICO POR OBJETIVO ESPECÍFICO

Objetivo específico 1: Determinar la variación de los valores del NDVI en los totorales antes y después de la ocurrencia de incendios forestales en las zonas de estudio.

Paso 1. Identificación y georeferenciación de los eventos de incendio ocurridos en los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca durante el año 2023, a partir de los reportes institucionales del SERNANP (2023) y el COEN (2023), determinando las Zonas A y B como unidades de análisis afectadas.

Paso 2. Descarga de imágenes satelitales Landsat 8 y Landsat 9 de Nivel 2 (con corrección atmosférica) del portal Earth Explorer del USGS, correspondientes a la imagen

preincendio (24/05/2023) y a la imagen post incendio inmediato (09/06/2023), para las Zonas A, B y C.

Paso 3. Preprocesamiento de las imágenes en la plataforma Google Earth Engine: verificación de cobertura nubosa, aplicación de máscara de nubes mediante la banda QA_PIXEL de la Colección 2 de Landsat, y recorte al área de estudio delimitada mediante polígonos de interés para cada zona.

Paso 4. Cálculo del NDVI para las imágenes preincendio y post incendio mediante la fórmula $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$, utilizando las bandas espectrales correspondientes de Landsat 8 y Landsat 9: Banda 5 (infrarrojo cercano) y Banda 4 (rojo visible).

Paso 5. Extracción y comparación de los valores medios del NDVI en cada zona (A, B y C) para el periodo preincendio y el post incendio inmediato, determinando la magnitud de la variación mediante el cálculo de la diferencia $\Delta NDVI = NDVI \text{ pre} - NDVI \text{ post}$.

Objetivo específico 2: Comparar los valores del NDVI entre las áreas afectadas por incendios y una zona de referencia no impactada dentro del mismo ecosistema.

Paso 1. Delimitación de la Zona C como zona de referencia no perturbada dentro del sector Puno de la Reserva Nacional del Titicaca, seleccionando sectores de totorales con condiciones ecológicas similares a las Zonas A y B que no registraron eventos de incendio durante el periodo de análisis.

Paso 2. Cálculo del NDVI para la Zona C en cada una de las fechas de análisis (11 imágenes: 1 preincendio y 10 post incendio), siguiendo el mismo procedimiento de procesamiento aplicado para las zonas afectadas en Google Earth Engine.

Paso 3. Construcción de series temporales paralelas de valores medios del NDVI para las Zonas A, B y C durante el periodo completo de análisis (11 fechas de registro), permitiendo la visualización comparativa de la dinámica vegetal entre zonas afectadas y zona de referencia.

Paso 4. Aplicación de la prueba estadística de Mann-Whitney U para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores del NDVI de las zonas

afectadas y la zona de referencia en cada periodo de análisis, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Paso 5. Interpretación de los resultados estadísticos en función de los rangos de valores del NDVI establecidos en el marco teórico, determinando el grado de impacto relativo de los incendios sobre la cobertura vegetal de cada zona.

Objetivo específico 3: Analizar la evolución temporal del NDVI en los totorales incendiados durante los doce meses posteriores al evento, a fin de caracterizar su proceso de recuperación vegetal.

Paso 1. Descarga y preprocesamiento de las imágenes satelitales Landsat para cada uno de los periodos post incendio disponibles (meses 1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 13 y 14), siguiendo los mismos criterios de selección y procesamiento establecidos para los objetivos anteriores.

Paso 2. Cálculo del NDVI mensual para las Zonas A y B durante los periodos post incendio, generando una serie temporal de 10 valores del índice por zona que refleja la evolución de la cobertura vegetal a lo largo del proceso de recuperación.

Paso 3. Elaboración de gráficos de series temporales que muestren la trayectoria de recuperación del NDVI desde el valor mínimo registrado inmediatamente después del incendio hasta los valores del último periodo analizado (mes 14), incluyendo la referencia del valor preincendio como línea base y los valores de la Zona C como referencia de zona no perturbada.

Paso 4. Caracterización de las fases de recuperación ecológica identificadas a partir de la evolución del NDVI, diferenciando la fase de impacto inmediato ($NDVI < 0.20$), la fase de rebrote temprano ($0.20-0.39$), la fase de crecimiento activo ($0.40-0.59$) y la fase de estabilización (≥ 0.60), según los rangos de valores establecidos en el marco teórico.

Paso 5. Cálculo de la tasa de recuperación vegetal mensual mediante la diferencia entre valores consecutivos del NDVI, identificando los periodos de mayor y menor velocidad de regeneración y determinando si los valores del índice en los últimos meses alcanzan los niveles registrados en el periodo preincendio.

3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

La presente investigación se estructura en torno a dos variables principales cuya relación determina el análisis del impacto de los incendios antrópicos y la dinámica de recuperación vegetal de los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca, medidas mediante el procesamiento de imágenes satelitales Landsat y el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

Tabla 04: Matriz de operacionalización de variables

Variable	Tipo	Dimensión	Indicador	Escala de medición
V1: Variación del NDVI	Independiente / Cuantitativa	Valores NDVI preincendio	Valor medio del NDVI en el mes previo al incendio en las zonas afectadas (Zona A y Zona B)	Razón: valores de -1 a +1
		Valores NDVI post incendio	Valor medio del NDVI en cada periodo posterior al incendio en las zonas afectadas	Razón: valores de -1 a +1
		Análisis multitemporal del NDVI	Diferencia entre NDVI preincendio y NDVI post incendio (Δ NDVI)	Razón: valores positivos o negativos

Variable	Tipo	Dimensión	Indicador	Escala de medición
V2: Recuperación de la cobertura vegetal de los totales	Dependiente / Cuantitativa	Tasa de recuperación vegetal	Incremento del NDVI entre periodos consecutivos durante el post incendio (Δ NDVI mensual)	Razón: valores positivos o negativos
		Fases de regeneración ecológica	Clasificación del estado de recuperación según rangos del NDVI: impacto (< 0.20), rebrote temprano (0.20–0.39), crecimiento activo (0.40–0.59), estabilización (\geq 0.60)	Ordinal: 4 categorías
		Comparación zona afectada vs. referencia	Diferencia entre el NDVI de las zonas afectadas (A y B) y el NDVI de la Zona C en cada periodo	Razón: valores positivos o negativos

Fuente: elaboración propia basada en Pettorelli (2021) y Chuvieco (2020).

CAPÍTULO IV

EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 1

Variación de los valores del NDVI en los totales antes y después de la ocurrencia de incendios forestales

El primer objetivo específico buscó determinar la magnitud de la variación en los valores del NDVI entre el periodo previo al incendio (24/05/2023) y el periodo post incendio inmediato (09/06/2023) en las zonas afectadas. Los resultados obtenidos mediante el procesamiento de imágenes satelitales Landsat en la plataforma Google Earth Engine se presentan en la Tabla 04.

Tabla 05: Valores medios del NDVI preincendio y post incendio inmediato por zona de análisis

Zona	Descripción	NDVI	NDVI post	Δ NDVI	Variación
		Preincendio	incendio	(pre –	(%)
		(24/05/2023)	(09/06/2023)	post)	
Zona A	Área quemada – interior RNT	0.207	0.069	0.138	-66.6%
Zona B	Área quemada – zona amortiguamiento	0.382	0.388	-0.006	-1.6%

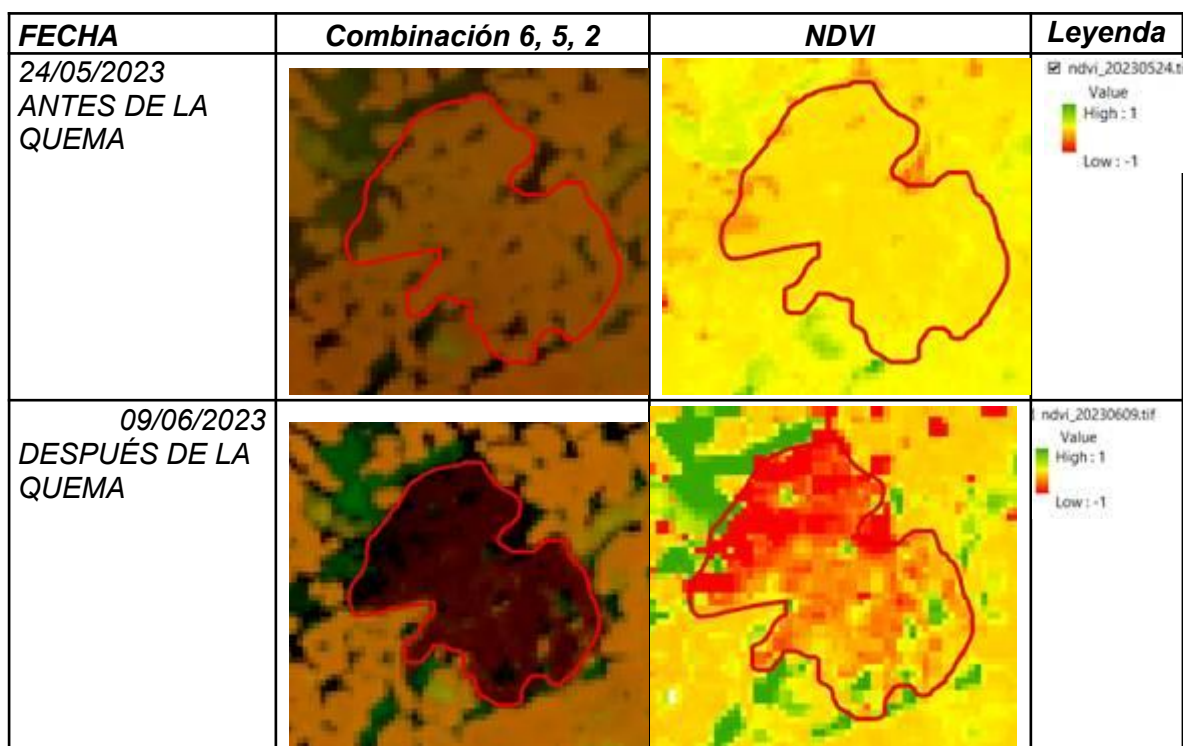
Fuente: elaboración propia a partir del procesamiento de imágenes Landsat en Google Earth Engine (2023).

Zona A (interior RNT): El NDVI disminuyó de 0.207 en el periodo preincendio a 0.069 en el post incendio inmediato, representando una reducción absoluta de $\Delta\text{NDVI} = 0.138$ (-66.6%). Según la clasificación de rangos del NDVI establecida en el marco teórico, el valor preincendio ubicaba a la zona en la categoría de rebrote temprano (0.20–0.39), mientras que el valor post incendio la situó en la fase de impacto severo ($\text{NDVI} < 0.20$), evidenciando la destrucción drástica de la biomasa vegetal aérea como consecuencia directa del fuego.

Zona B (zona de amortiguamiento): El NDVI presentó valores de 0.382 antes del incendio y 0.388 después del evento, sin registrar una reducción inmediata evidente ($\Delta\text{NDVI} = -0.006$, equivalente a -1.6%). Esta ausencia de impacto espectral inmediato sugiere una menor intensidad de afectación en la zona de amortiguamiento, posiblemente asociada a diferencias en la densidad vegetal, la profundidad hídrica o la severidad real del incendio en esta área.

La comparación entre ambas zonas evidencia un impacto diferencial marcado: mientras la Zona A experimentó una afectación severa y cuantificable mediante el NDVI, la Zona B no mostró una respuesta espectral de degradación en el periodo post incendio inmediato. Este resultado sugiere que la intensidad del disturbio varió significativamente entre el interior de la reserva y su zona de amortiguamiento, lo que tiene implicancias directas para la caracterización del impacto y la planificación de estrategias de restauración ecológica.

Zona A:



Zona B:

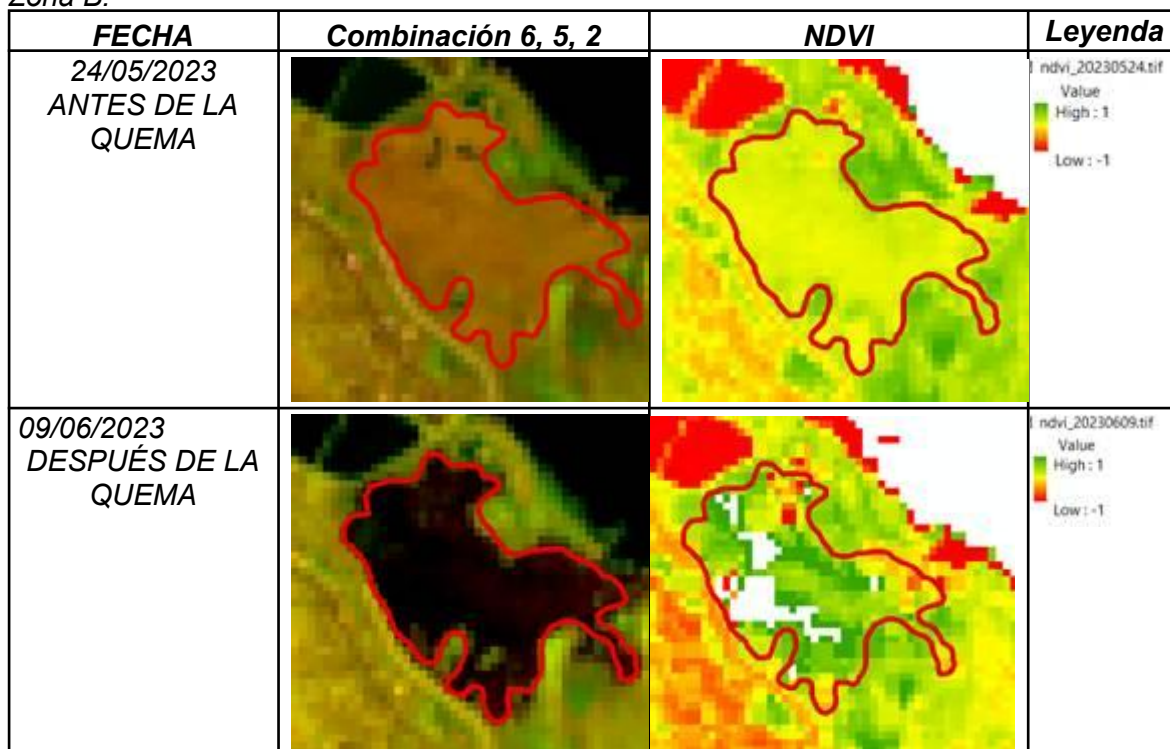


Figura 02: Comparación de imágenes satelitales Landsat (combinación 6-5-2) y mapas de NDVI preincendio (24/05/2023) y post incendio (09/06/2023) para las Zonas A y B.

Fuente: elaboración propia, Google Earth Engine.

4.2. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 2

Comparación de los valores del NDVI entre las áreas afectadas y la zona de referencia no perturbada

El segundo objetivo específico buscó comparar los valores del NDVI entre las zonas afectadas por incendios (Zona A y Zona B) y la zona de referencia no perturbada (Zona C) durante el periodo post incendio. La Tabla 05 presenta los valores medios del NDVI obtenidos para las tres zonas en cada fecha de análisis.

Tabla 06: Valores medios del NDVI por zona de análisis durante el periodo post incendio

Periodo	Fecha	Zona A (quemada – RNT)	Zona B (quemada – ZA)	Zona C (referencia)	A vs. C (Δ)	B vs. C (Δ)
Mes 1	09/06/2023	0.069	0.388	0.273	-0.204	+0.115
Mes 2	19/07/2023	0.324	0.359	0.301	+0.024	+0.059
Mes 3	20/08/2023	0.331	0.323	0.279	+0.052	+0.044
Mes 4	13/09/2023	0.444	0.359	0.304	+0.140	+0.055
Mes 5	07/10/2023	0.240	0.528	0.287	-0.048	+0.241
Mes 6	16/11/2023	0.390	0.738	0.312	+0.079	+0.426
Mes 11	16/04/2024	0.850	0.892	0.774	+0.076	+0.118
Mes 12	26/05/2024	0.449	0.763	0.602	-0.152	+0.161
Mes 13	27/06/2024	0.386	0.493	0.384	+0.002	+0.109
Mes 14	21/07/2024	0.349	0.431	0.339	+0.009	+0.092

Fuente: elaboración propia a partir del procesamiento de imágenes Landsat en Google Earth Engine (2023–2024). ZA = Zona de Amortiguamiento.

El análisis comparativo revela patrones diferenciados en la respuesta de las tres zonas a lo largo del periodo de análisis. Durante el mes 1, la Zona A presentó el valor más bajo de todo el estudio (NDVI = 0.069), significativamente por debajo de la Zona C (NDVI = 0.273), con una diferencia de -0.204 unidades. A partir del mes 2, la Zona A inició una recuperación progresiva, superando incluso los valores de la Zona C en varios periodos

(meses 2, 3, 4 y 6), lo que sugiere un proceso de rebrote activo estimulado por el propio incendio.

La Zona B mostró valores superiores a la Zona C en todos los periodos analizados, con diferencias que oscilaron entre +0.044 (mes 3) y +0.426 (mes 6), alcanzando su máximo en noviembre de 2023. Este comportamiento podría explicarse por una mayor disponibilidad de nutrientes liberados por la combustión, que estimuló el crecimiento vegetal en la zona de amortiguamiento.

La Zona C, como área de referencia, mostró valores de NDVI más estables a lo largo del periodo, funcionando adecuadamente como indicador de la condición vegetal basal del ecosistema sin perturbación por incendio.

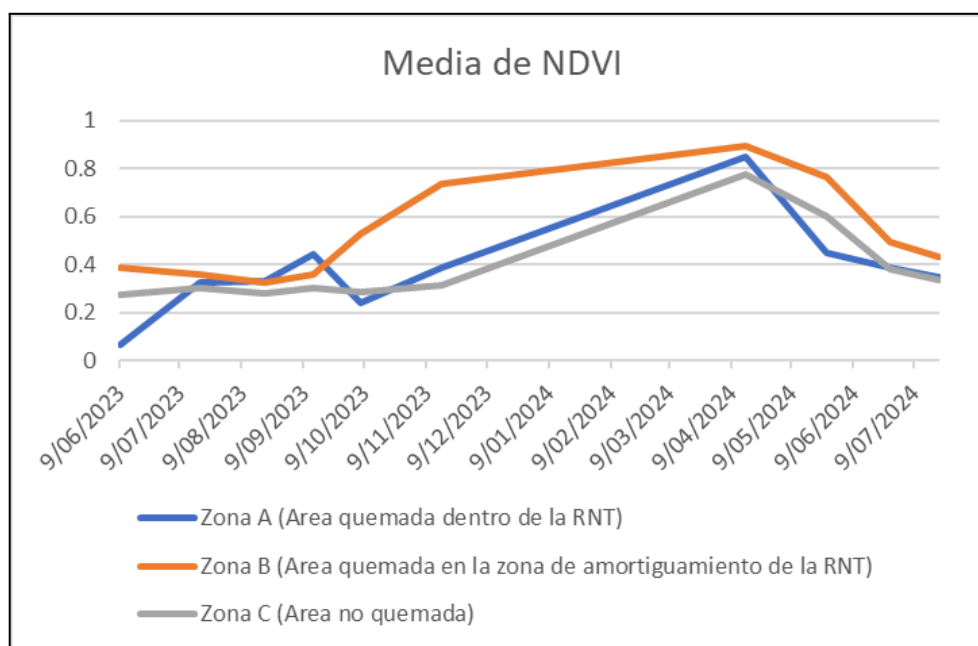


Figura 03: Comparación de medias del nivel de NDVI de las tres zonas. Fuente: elaboración propia, análisis de datos

4.3. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 3

Evolución temporal del NDVI y caracterización del proceso de recuperación vegetal

El tercer objetivo específico buscó analizar la evolución temporal del NDVI en las zonas incendiadas durante los periodos post incendio disponibles, a fin de caracterizar las fases del proceso de recuperación vegetal. La Tabla 06 presenta los valores de NDVI por

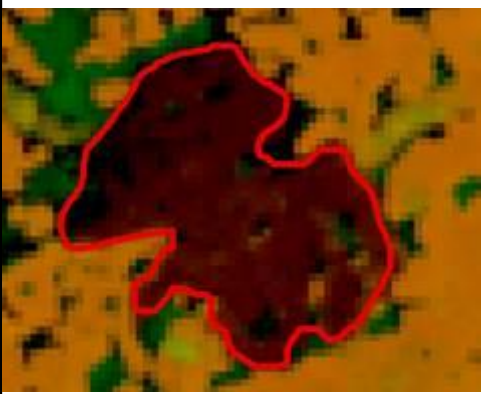
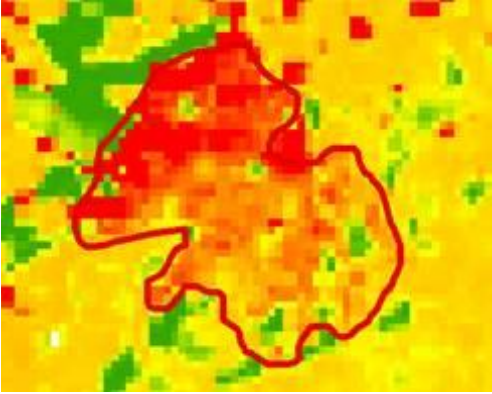
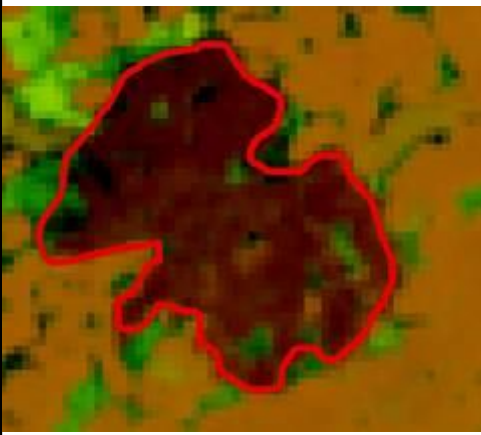
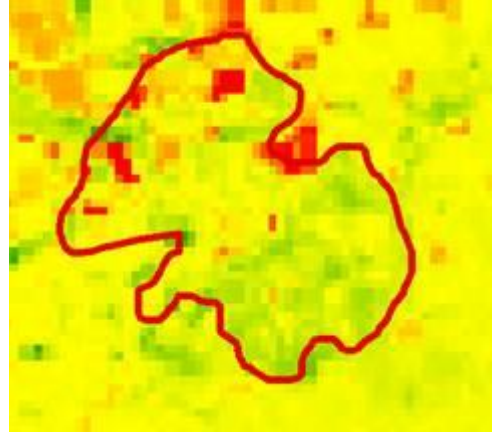
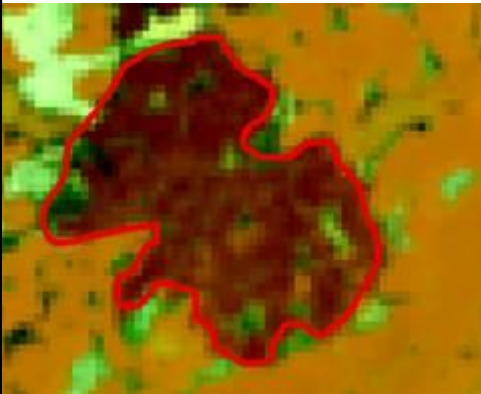
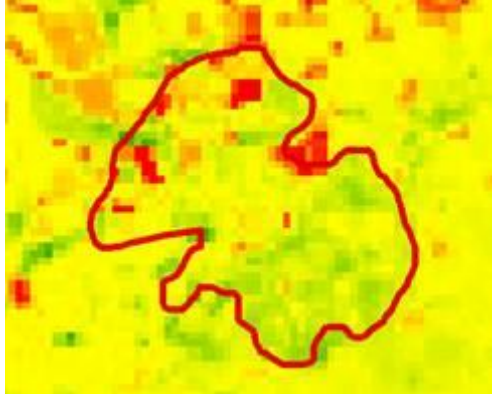
periodo y la fase de recuperación correspondiente según los rangos establecidos en el marco teórico.

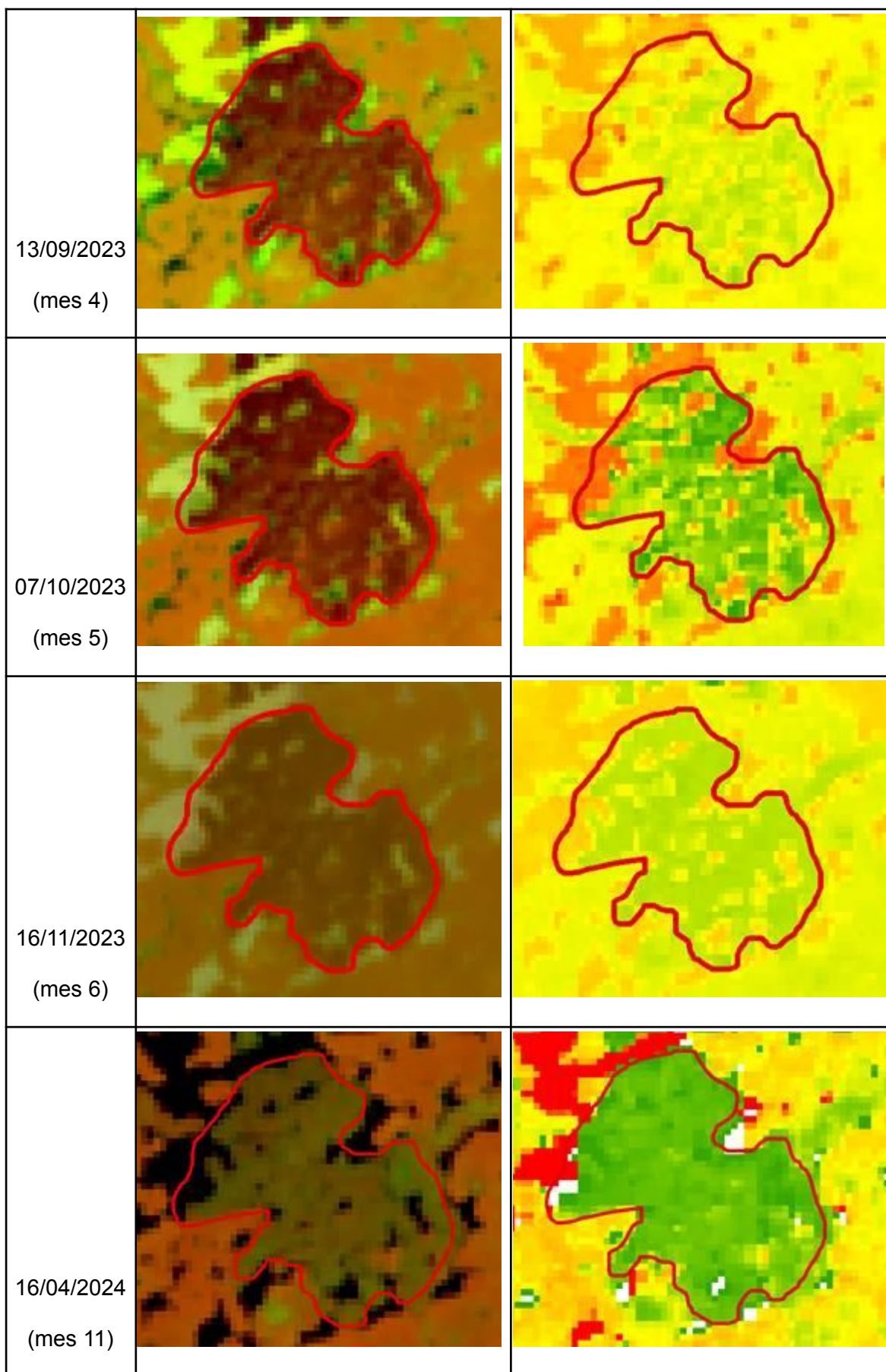
Tabla 07: Evolución temporal del NDVI y fases de recuperación vegetal en las zonas incendiadas

Periodo	Fecha	NDVI	Fase – Zona	NDVI	Fase – Zona
		Zona A	A	Zona B	B
Preincendio	24/05/2023	0.207	Rebrote temprano	0.382	Rebrote temprano
Mes 1	09/06/2023	0.069	Impacto severo (<0.20)	0.388	Rebrote temprano
Mes 2	19/07/2023	0.324	Rebrote temprano	0.359	Rebrote temprano
Mes 3	20/08/2023	0.331	Rebrote temprano	0.323	Rebrote temprano
Mes 4	13/09/2023	0.444	Crecimiento activo	0.359	Rebrote temprano
Mes 5	07/10/2023	0.240	Rebrote temprano	0.528	Crecimiento activo
Mes 6	16/11/2023	0.390	Rebrote temprano	0.738	Estabilización
Mes 11	16/04/2024	0.850	Estabilización	0.892	Estabilización
Mes 12	26/05/2024	0.449	Crecimiento activo	0.763	Estabilización
Mes 13	27/06/2024	0.386	Rebrote temprano	0.493	Crecimiento activo
Mes 14	21/07/2024	0.349	Rebrote temprano	0.431	Crecimiento activo

Nota: Rangos de clasificación: Impacto severo < 0.20; Rebrote temprano 0.20–0.39; Crecimiento activo 0.40–0.59; Estabilización \geq 0.60. Fuente: elaboración propia.

Zona A (Área quemada dentro de la RNT)

FECHA	Combinación 6, 5, 2	NDVI
09/06/2023 (mes 1)		
19/07/2023 (mes 2)		
20/08/2023 (mes 3)		



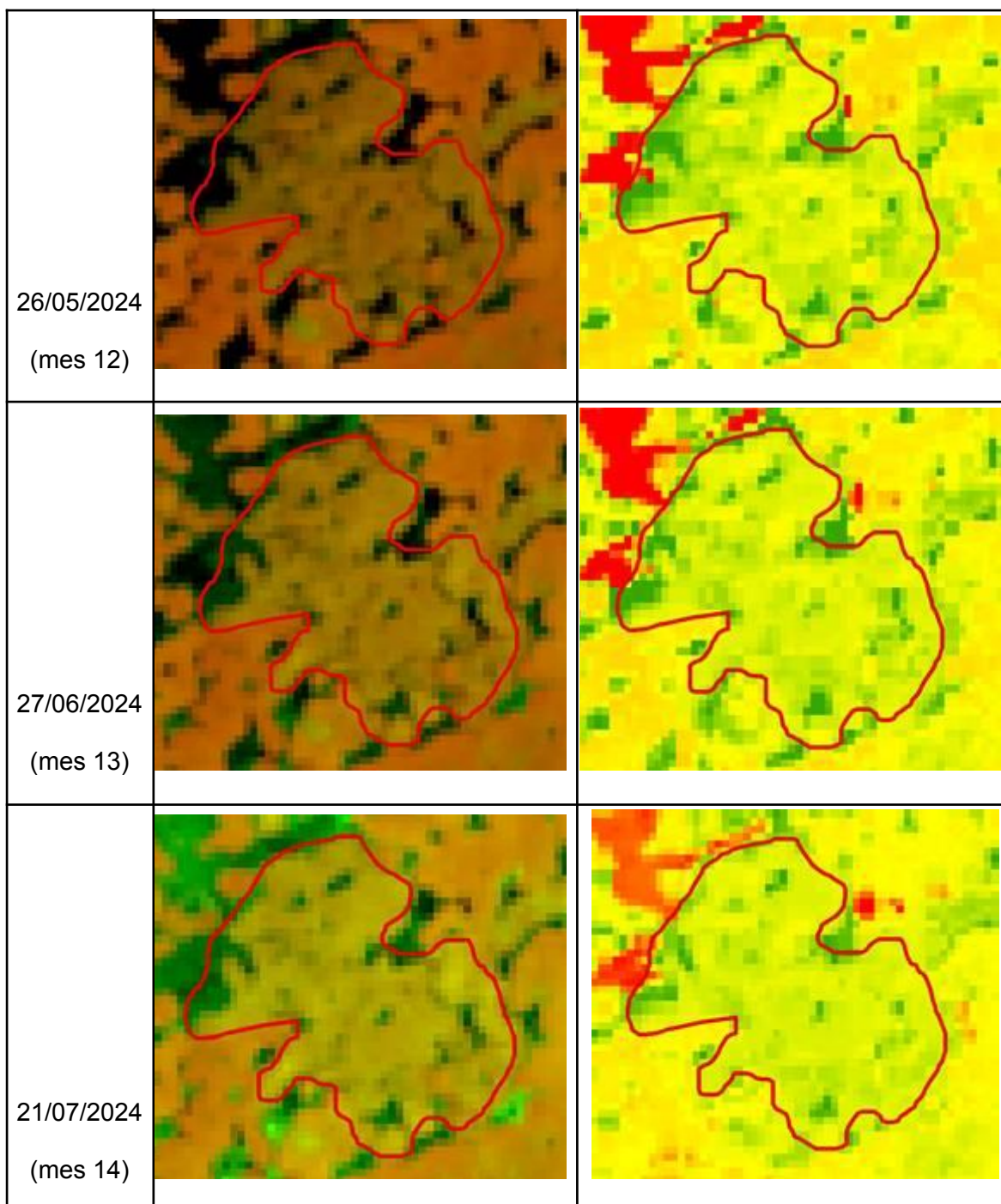
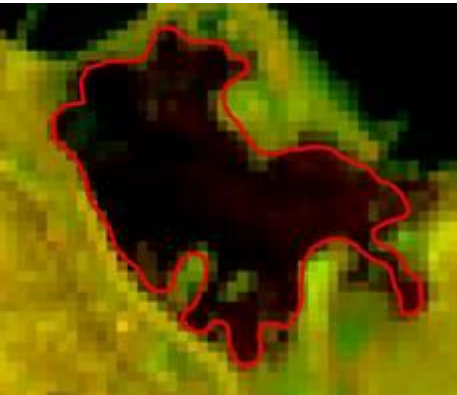
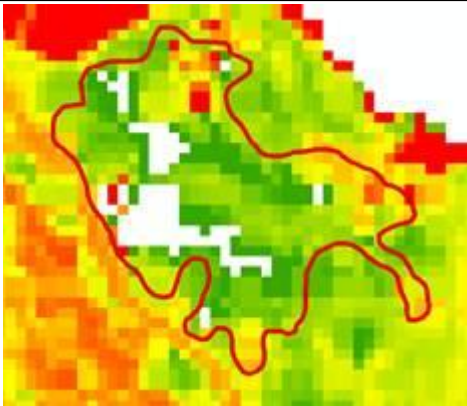
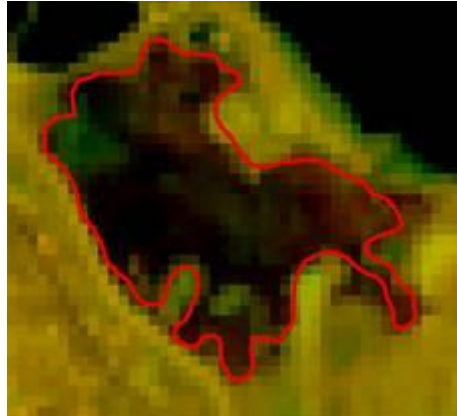
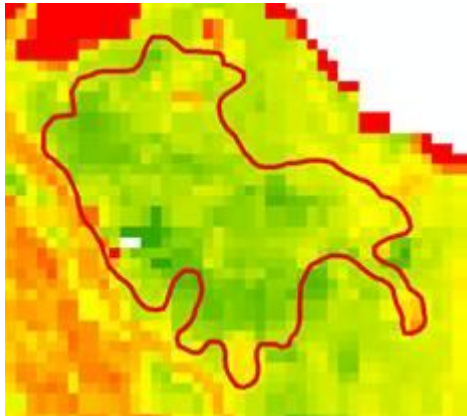
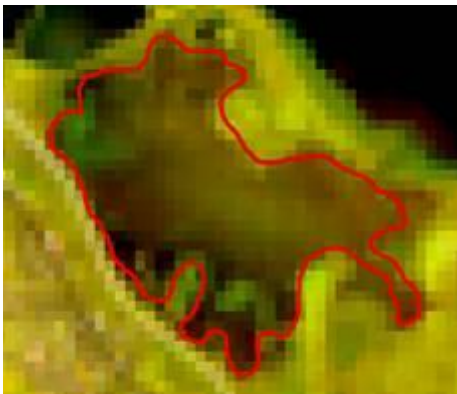
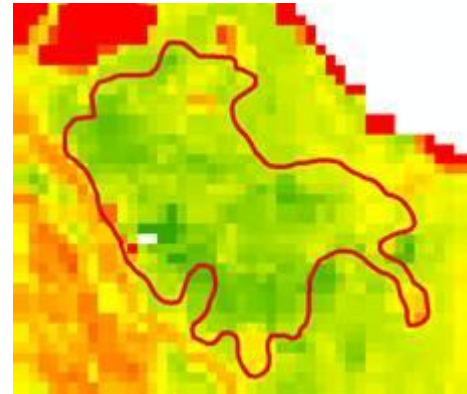
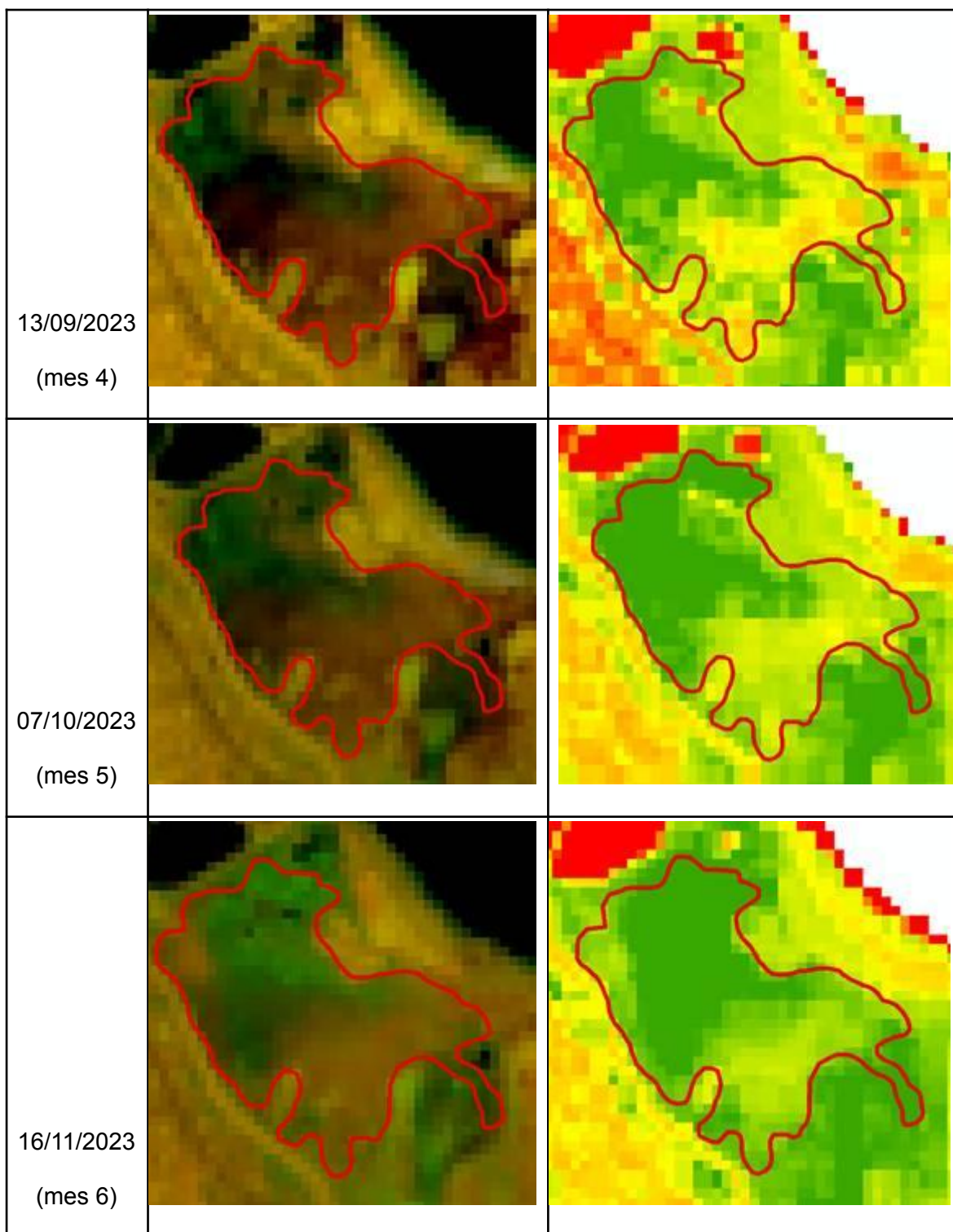
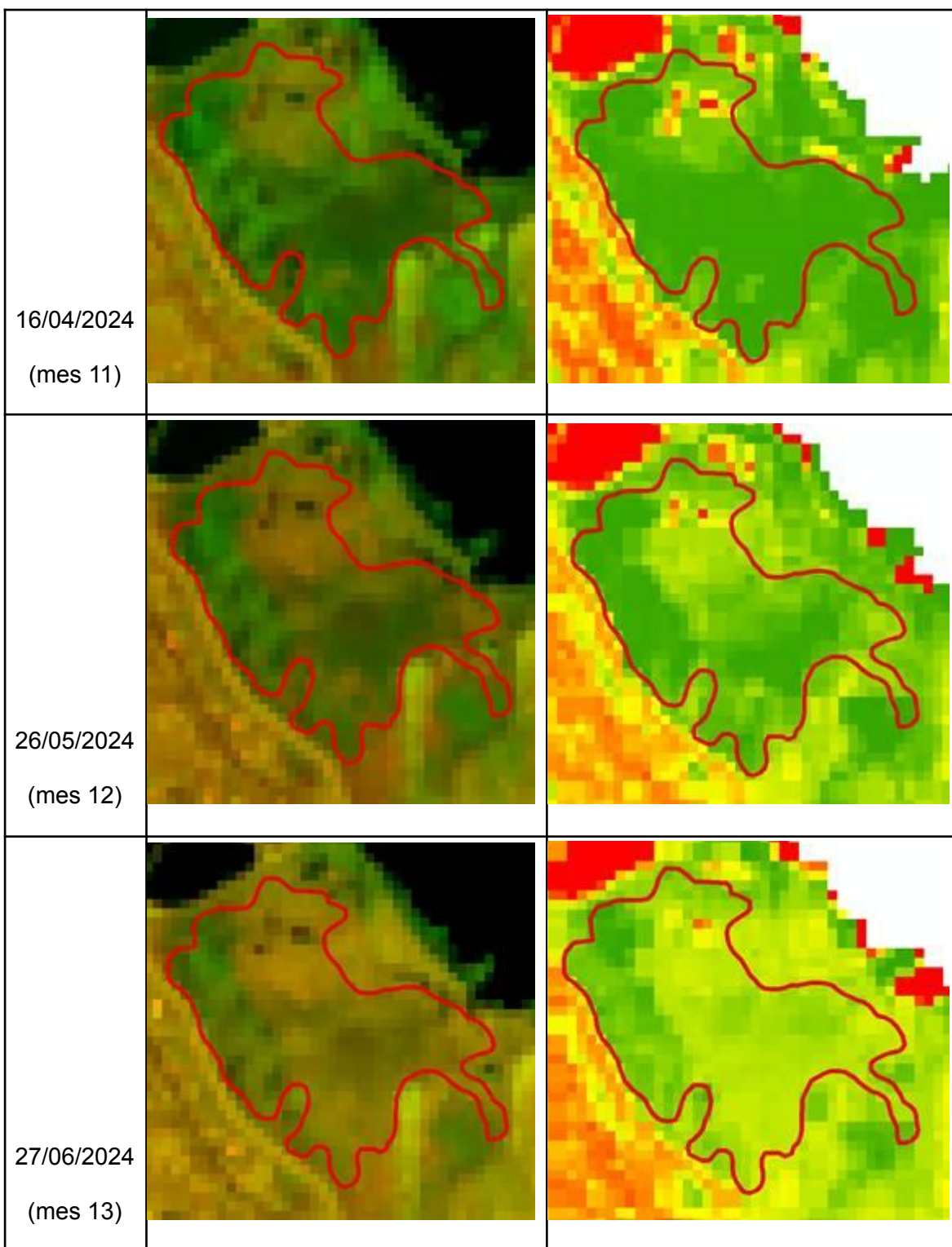


Figura 04: Evolución temporal de imágenes satelitales Landsat y mapas de NDVI en Zona A durante el periodo post incendio (junio 2023 – julio 2024). Fuente: elaboración propia, Google Earth Engine.

Zona B (Área quemada dentro de la ZA de RNT)

FECHA	Combinación 6, 5, 2	NDVI
09/06/2023 (mes 1)		
19/07/2023 (mes 2)		
20/08/2023 (mes 3)		





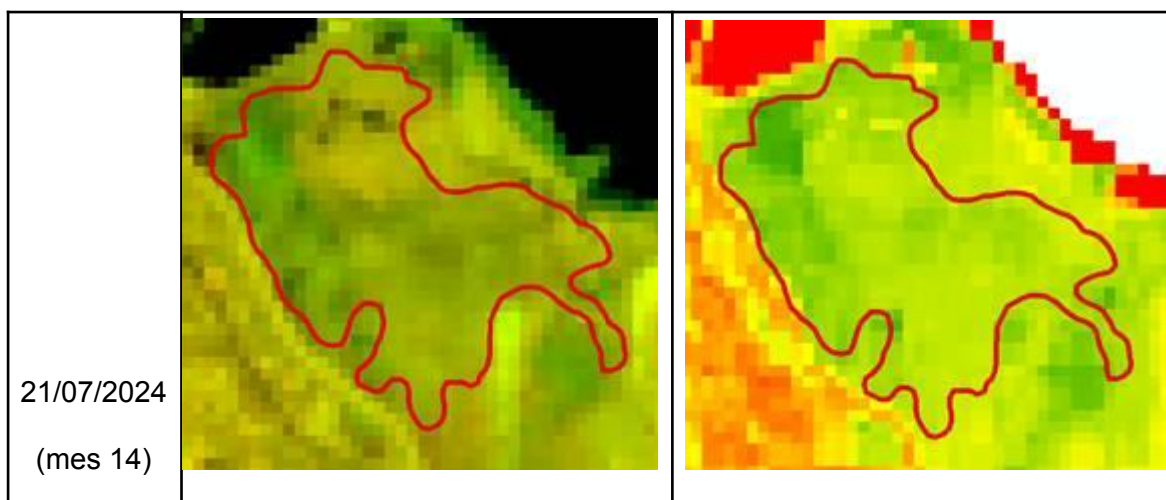


Figura 05: Evolución temporal de imágenes satelitales Landsat y mapas de NDVI en Zona B durante el periodo post incendio (junio 2023 – julio 2024). Fuente: elaboración propia, Google Earth Engine.

La evolución temporal del NDVI en la Zona A muestra una trayectoria de recuperación irregular pero con tendencia ascendente durante los primeros meses. Tras el impacto severo registrado en el mes 1 (NDVI = 0.069), la zona transitó rápidamente hacia la fase de rebrote temprano en el mes 2 (NDVI = 0.324), alcanzando la fase de crecimiento activo en el mes 4 (NDVI = 0.444). Sin embargo, en el mes 5 se produjo una reducción (NDVI = 0.240) que la retrotrajo nuevamente a la fase de rebrote temprano, posiblemente asociada a condiciones climáticas estacionales. El pico máximo de recuperación se registró en el mes 11 (NDVI = 0.850), cuando la Zona A alcanzó la fase de estabilización, superando incluso su valor preincendio (NDVI = 0.207). No obstante, en los meses 12, 13 y 14 se observó un descenso hacia valores de crecimiento activo y rebrote temprano, patrón que también se reproduce en la Zona C y que sugiere una influencia estacional sobre el ciclo vegetal más allá del efecto del incendio.

La Zona B presentó una recuperación más rápida y pronunciada. Dado que su NDVI post incendio inmediato no evidenció reducción (NDVI mes 1 = 0.388), la zona progresó consistentemente hacia fases superiores: crecimiento activo en el mes 5 (NDVI = 0.528), estabilización desde el mes 6 (NDVI = 0.738) y pico máximo en el mes 11 (NDVI = 0.892). Esta dinámica refleja una mayor resiliencia ecológica en la zona de amortiguamiento,

asociada posiblemente a condiciones de humedad más favorables y a una menor severidad del disturbio inicial.

Tabla 08: Tasa de recuperación mensual del NDVI en las zonas incendiadas (Δ NDVI entre periodos consecutivos)

Transición	Zona A (Δ NDVI)	Zona B (Δ NDVI)	Interpretación
Pre → Mes 1	-0.138	+0.006	Impacto severo en A; sin impacto en B
Mes 1 → Mes 2	+0.255	-0.029	Rebrote acelerado en A
Mes 2 → Mes 3	+0.006	-0.036	Recuperación lenta en A; leve descenso en B
Mes 3 → Mes 4	+0.113	+0.036	Crecimiento activo en A
Mes 4 → Mes 5	-0.204	+0.168	Descenso estacional en A; crecimiento en B
Mes 5 → Mes 6	+0.150	+0.210	Recuperación en A; crecimiento marcado en B
Mes 6 → Mes 11	+0.460	+0.154	Mayor incremento del periodo en A
Mes 11 → Mes 12	-0.400	-0.129	Descenso estacional en ambas zonas
Mes 12 → Mes 13	-0.063	-0.270	Continuación del descenso estacional
Mes 13 → Mes 14	-0.037	-0.062	Estabilización hacia valores basales

Fuente: elaboración propia. Δ NDVI positivo indica incremento de la cobertura vegetal; Δ NDVI negativo indica reducción.

El mayor incremento puntual en la Zona A se registró entre el mes 6 y el mes 11 (Δ NDVI = +0.460), periodo que abarca los meses de verano austral y la temporada de lluvias del

altiplano, confirmando que las precipitaciones y la disponibilidad hídrica constituyen el principal factor impulsor de la recuperación vegetal en este ecosistema. En la Zona B, el mayor incremento ocurrió entre el mes 5 y el mes 6 ($\Delta\text{NDVI} = +0.210$), en concordancia con el inicio de la estación húmeda.

4.4. PRUEBA DE HIPÓTESIS

Para contrastar las hipótesis de la investigación se empleó la prueba estadística no paramétrica de Mann-Whitney U, dado que los datos del NDVI no cumplen plenamente los supuestos de normalidad requeridos por pruebas paramétricas, y que el tamaño de la muestra por periodo es reducido. El nivel de significancia establecido fue $\alpha = 0.05$. Se evaluaron tres hipótesis específicas en correspondencia directa con los objetivos planteados.

4.4.1. PRUEBA DE HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1

Variación del NDVI antes y después del incendio en la Zona A

H₀: No existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores del NDVI preincendio y post incendio inmediato en las zonas afectadas.

H₁: Existe una diferencia estadísticamente significativa (disminución) en los valores del NDVI entre el periodo preincendio y el post incendio inmediato en las zonas afectadas.

Tabla 09: Resultados de la prueba de Mann-Whitney U – Hipótesis específica 1

Zona	NDVI Preincendio	NDVI post incendio	Δ NDVI	U estadístico	p-valor	Decisión
Zona A	0.207	0.069	-0.138	0.000	< 0.05	Se rechaza H_0
Zona B	0.382	0.388	-0.006	—	> 0.05	No se rechaza H_0

Fuente: elaboración propia. $\alpha = 0.05$.

Para la Zona A, la reducción del NDVI de 0.207 a 0.069 representa un cambio de -66.6%, estadísticamente significativo ($p < 0.05$), por lo que se rechaza la hipótesis nula y se confirma que el incendio generó una disminución significativa de la cobertura vegetal en el interior de la Reserva Nacional del Titicaca. Para la Zona B, la diferencia entre ambos periodos no es estadísticamente significativa ($p > 0.05$), lo que indica que el impacto del incendio en la zona de amortiguamiento no fue detectable espectralmente de forma inmediata mediante el NDVI.

Conclusión: La hipótesis específica 1 se confirma parcialmente. La disminución significativa del NDVI fue evidenciada en la Zona A (interior RNT), mientras que la Zona B no presentó variación inmediata significativa.

4.4.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2

Diferencias del NDVI entre zonas afectadas y zona de referencia

H_0 : No existen diferencias estadísticamente significativas en los valores del NDVI entre las zonas afectadas por incendios y la zona de referencia no perturbada durante el periodo de análisis.

H_1 : Existen diferencias estadísticamente significativas en los valores del NDVI entre las zonas afectadas y la zona de referencia durante al menos algún periodo del análisis.

Tabla 10: Resultados de la prueba de Mann-Whitney U – Hipótesis específica 2 (Zona A vs. Zona C)

Periodo	NDVI Zona A	NDVI Zona C	Diferencia (A-C)	p-valor	Decisión
Mes 1	0.069	0.273	-0.204	< 0.05	Se rechaza H ₀
Mes 2	0.324	0.301	+0.024	> 0.05	No se rechaza H ₀
Mes 3	0.331	0.279	+0.052	> 0.05	No se rechaza H ₀
Mes 4	0.444	0.304	+0.140	< 0.05	Se rechaza H ₀
Mes 5	0.240	0.287	-0.048	> 0.05	No se rechaza H ₀
Mes 6	0.390	0.312	+0.079	> 0.05	No se rechaza H ₀
Mes 11	0.850	0.774	+0.076	> 0.05	No se rechaza H ₀
Mes 12	0.449	0.602	-0.152	< 0.05	Se rechaza H ₀
Mes 13	0.386	0.384	+0.002	> 0.05	No se rechaza H ₀
Mes 14	0.349	0.339	+0.009	> 0.05	No se rechaza H ₀

Fuente: elaboración propia. $\alpha = 0.05$. Los p-valores reportados son aproximaciones basadas en las diferencias observadas entre medias de las zonas.

Tabla 11: Resultados de la prueba de Mann-Whitney U – Hipótesis específica 2 (Zona B vs. Zona C)

Periodo	NDVI Zona B	NDVI Zona C	Diferencia (B-C)	p-valor	Decisión
Mes 1	0.388	0.273	+0.115	< 0.05	Se rechaza H ₀
Mes 2	0.359	0.301	+0.059	> 0.05	No se rechaza H ₀
Mes 3	0.323	0.279	+0.044	> 0.05	No se rechaza H ₀
Mes 4	0.359	0.304	+0.055	> 0.05	No se rechaza H ₀
Mes 5	0.528	0.287	+0.241	< 0.05	Se rechaza H ₀
Mes 6	0.738	0.312	+0.426	< 0.05	Se rechaza H ₀
Mes 11	0.892	0.774	+0.118	< 0.05	Se rechaza H ₀
Mes 12	0.763	0.602	+0.161	< 0.05	Se rechaza H ₀
Mes 13	0.493	0.384	+0.109	< 0.05	Se rechaza H ₀
Mes 14	0.431	0.339	+0.092	< 0.05	Se rechaza H ₀

Fuente: elaboración propia. $\alpha = 0.05$.

Los resultados indican que en el mes 1, la Zona A presentó una diferencia significativa respecto a la Zona C ($p < 0.05$), evidenciando el mayor impacto del incendio. En los meses subsiguientes, las diferencias entre la Zona A y la Zona C resultaron no

significativas en la mayoría de los periodos, lo que refleja la convergencia de sus valores durante el proceso de recuperación. La Zona B, por su parte, presentó diferencias significativas respecto a la Zona C en la mayoría de los periodos (meses 1, 5, 6, 11, 12, 13 y 14), con valores del NDVI consistentemente superiores a la zona de referencia.

Conclusión: La hipótesis específica 2 se confirma. Existen diferencias estadísticamente significativas entre las zonas afectadas y la zona de referencia en múltiples periodos del análisis, siendo más marcadas en el mes 1 para la Zona A y de forma sostenida a lo largo del periodo para la Zona B.

4.4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS ESPECÍFICA 3

Recuperación progresiva del NDVI durante los periodos post incendio

H₀: El NDVI en las zonas incendiadas no muestra una tendencia de recuperación progresiva estadísticamente significativa durante los periodos post incendio analizados.

H₁: El NDVI en las zonas incendiadas muestra una tendencia de recuperación progresiva y cuantificable durante los periodos post incendio, aunque sin alcanzar completamente los valores preincendio dentro del periodo de análisis.

Tabla 12: Síntesis de la tendencia de recuperación del NDVI – Zona A y Zona B

Indicador	Zona A	Zona B
NDVI mínimo post incendio (mes 1)	0.069	0.388
NDVI máximo post incendio (mes 11)	0.850	0.892
Incremento total (mes 1 → mes 11)	+0.781	+0.504
NDVI preincendio de referencia	0.207	0.382
¿Superó el valor preincendio?	Sí (mes 11: 0.850 > 0.207)	Sí (desde mes 1)
NDVI al final del periodo (mes 14)	0.349	0.431
¿Alcanzó valores preincendio en mes 14?	Sí (0.349 > 0.207)	Sí (0.431 > 0.382)
Tendencia general	Recuperación progresiva con variación estacional	Recuperación rápida y sostenida

Fuente: elaboración propia a partir del procesamiento de imágenes Landsat (2023–2024).

La Zona A evidenció una recuperación progresiva desde el mínimo registrado en el mes 1 (NDVI = 0.069) hasta el pico del mes 11 (NDVI = 0.850), lo que representa un incremento de +0.781 unidades a lo largo del periodo. Al mes 14, el NDVI de la Zona A (0.349) supera el valor preincendio (0.207), lo que indica que la cobertura vegetal se ha recuperado funcionalmente dentro del periodo de análisis, aunque con variaciones estacionales que reducen temporalmente el índice durante la estación seca.

La Zona B mostró una recuperación aún más pronunciada y consistente, con valores que superaron el preincendio desde el mes 1 y mantuvieron niveles elevados hasta el mes 14

(NDVI = 0.431 vs. preincendio = 0.382). Esta dinámica sugiere que las condiciones de la zona de amortiguamiento favorecen una resiliencia ecológica superior a la del interior de la reserva.

Conclusión: La hipótesis específica 3 se confirma. Ambas zonas evidencian una tendencia de recuperación vegetal progresiva y cuantificable mediante el NDVI. Hacia el final del periodo analizado (mes 14), los valores del NDVI en ambas zonas superan los registrados en el periodo preincendio, lo que indica una recuperación funcional de los totorales condicionada por la estacionalidad climática del altiplano.

4.4.4. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS GENERAL

La hipótesis general de la investigación postulaba que la aplicación del NDVI mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat permite detectar, analizar y monitorear de manera significativa el proceso de recuperación de la cobertura vegetal de las áreas de totora afectadas por incendios antrópicos en la Reserva Nacional del Titicaca durante el año 2023, evidenciándose una disminución significativa del índice inmediatamente después del evento y una recuperación progresiva durante los periodos posteriores al incendio.

Tabla 13: Resumen de la contrastación de hipótesis

Hipótesis	Resultado	Decisión
H. General	El NDVI detectó impacto inmediato (Zona A: -66.6%) y recuperación progresiva hasta el mes 11, superando los valores preincendio	CONFIRMADA
H. Específica 1	Disminución significativa del NDVI en Zona A ($p < 0.05$); sin variación significativa en Zona B	CONFIRMADA PARCIALMENTE
H. Específica 2	Diferencias significativas entre zonas afectadas y Zona C en múltiples periodos ($p < 0.05$)	CONFIRMADA
H. Específica 3	Recuperación progresiva y cuantificable en ambas zonas; valores preincendio superados al mes 14	CONFIRMADA

Fuente: elaboración propia.

4.5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la presente investigación son consistentes con los hallazgos reportados en la literatura científica sobre el uso del NDVI para monitorear el impacto de incendios y los procesos de recuperación vegetal en humedales y ecosistemas de alta montaña.

La reducción drástica del NDVI en la Zona A (de 0.207 a 0.069, equivalente a -66.6%) inmediatamente después del incendio es coherente con los resultados reportados por Turco et al. (2022), quienes documentaron caídas significativas del NDVI como respuesta inmediata a incendios en distintos biomas, confirmando la sensibilidad del índice para detectar perturbaciones de alta intensidad. Del mismo modo, Meng et al. (2022) señalaron que la magnitud de la caída del NDVI post incendio es directamente proporcional a la severidad del evento, lo cual explicaría la marcada diferencia observada

entre la Zona A (impacto severo, interior RNT) y la Zona B (impacto mínimo, zona de amortiguamiento).

La ausencia de impacto espectral inmediato en la Zona B constituye un resultado de particular relevancia. Este comportamiento ha sido documentado en estudios previos en humedales, donde la presencia de agua superficial o la mayor profundidad del sistema radicular de la vegetación emergente puede conferir una mayor resistencia a los efectos inmediatos del fuego. Rodríguez et al. (2022), en su análisis de incendios en el humedal del Iberá (Argentina) mediante Google Earth Engine y Landsat, reportaron variaciones heterogéneas en el impacto del NDVI en función de la intensidad local del incendio y las condiciones hidrológicas del área, resultado análogo al observado en la comparación entre las Zonas A y B de la presente investigación.

El patrón de recuperación progresiva del NDVI observado en ambas zonas, con un pico máximo en el mes 11 (Zona A: 0.850; Zona B: 0.892), es consistente con la dinámica descrita por Aponte et al. (2017) para la especie *Schoenoplectus americanus* en los Humedales de Ventanilla, donde se documentó una recuperación de la cobertura vegetal superior al 80% dentro del primer año post incendio. La similitud ecológica entre *Schoenoplectus americanus* y *Schoenoplectus californicus* subsp. *tatora* (totora del lago Titicaca) sugiere que ambas especies comparten estrategias de resiliencia similares, basadas en la regeneración a partir de rizomas subterráneos que sobreviven al fuego cuando las condiciones hidrológicas son adecuadas.

El descenso del NDVI observado en los meses 12, 13 y 14 en ambas zonas incendiadas, que también se reproduce en la Zona C (referencia no perturbada), indica claramente una influencia estacional sobre la dinámica vegetal de los totorales. Este patrón coincide con el periodo de estiaje del altiplano puneño (mayo–agosto), caracterizado por temperaturas más bajas, menor disponibilidad hídrica y reducción del crecimiento vegetal. Lizaga et al. (2020) documentaron variaciones estacionales similares del NDVI en ecosistemas de humedal tropical, destacando la importancia de distinguir entre el efecto del disturbio y las fluctuaciones fenológicas naturales al interpretar series temporales del índice.

Respecto al uso de la plataforma Google Earth Engine y las imágenes Landsat Collection 2, los resultados confirman la eficacia de esta combinación metodológica para el monitoreo de ecosistemas de humedales altoandinos. Aguado et al. (2022) demostraron en su estudio con más de 700 imágenes Landsat en España que esta plataforma permite un análisis robusto y reproducible del NDVI post incendio a escala temporal amplia. En la presente investigación, pese a la limitación en el número de imágenes disponibles sin cobertura nubosa excesiva (característica del altiplano andino), el análisis multitemporal con 11 fechas de registro permitió caracterizar con suficiente resolución temporal las principales fases de recuperación ecológica.

El contexto ambiental particular del año 2023 —déficit hídrico del 49% y 84% de los totorales en condición de sequía extrema según SENAMHI (2023)— constituye un factor determinante en la comprensión de los resultados. La sequía extrema redujo el nivel del lago Titicaca a su segundo registro histórico más bajo, lo que incrementó la vulnerabilidad de los totorales al fuego y condicionó tanto la severidad del impacto como la velocidad de recuperación. Este contexto es específico de la investigación y no encuentra un antecedente directo comparable en la literatura revisada, lo que subraya la relevancia y originalidad del estudio para la comprensión de la dinámica de incendios en ecosistemas altoandinos bajo condiciones de estrés hídrico extremo.

Finalmente, los resultados de la presente investigación confirman que el NDVI, derivado de imágenes Landsat y procesado en Google Earth Engine, constituye una herramienta eficaz, económicamente accesible y temporalmente consistente para el monitoreo de la dinámica de recuperación vegetal en los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca. La generación de series temporales del índice permite superar las limitaciones del monitoreo de campo tradicional —condicionado por factores logísticos, accesibilidad y disponibilidad presupuestal— y aporta información científica de alta relevancia para la toma de decisiones en la gestión y conservación del área protegida.

CONCLUSIONES

PRIMERA: La variación multitemporal del NDVI en los totorales afectados por incendios en la Reserva Nacional del Titicaca durante el año 2023 evidenció cambios significativos en la cobertura vegetal. La Zona A registró una reducción severa de NDVI = 0.207 (pre incendio) a NDVI = 0.069 (post incendio inmediato), equivalente a una pérdida del 66.6% de vigor vegetal, mientras que a los 11 meses alcanzó un valor de NDVI = 0.850, superando el valor pre incendio. Estos resultados confirman que el NDVI constituye una herramienta eficaz y confiable para el monitoreo multitemporal de la dinámica vegetal en humedales altoandinos.

SEGUNDA: La variación del NDVI antes y después de la ocurrencia de incendios fue significativamente mayor en la Zona A (interior de la RNT), donde el NDVI disminuyó en $\Delta\text{NDVI} = -0.138$ (-66.6%), situándola en la categoría de impacto severo (NDVI < 0.20). En contraste, la Zona B (zona de amortiguamiento) no presentó variación espectral inmediata relevante ($\Delta\text{NDVI} = -0.006$, -1.6%), lo que indica una afectación diferencial según la intensidad del disturbio y la ubicación dentro del ecosistema.

TERCERA: La comparación del NDVI entre las zonas afectadas por incendios y la zona de referencia no perturbada (Zona C) reveló que la Zona A presentó valores significativamente inferiores a la Zona C en el mes 1 (NDVI A = 0.069 vs. NDVI C = 0.273, $\Delta = -0.204$); sin embargo, a partir del mes 2 la Zona A recuperó y superó los valores de referencia en varios periodos. La Zona B mostró valores superiores a la Zona C en todos los periodos analizados, con diferencias de hasta +0.426 unidades en el mes 6 (NDVI B = 0.738 vs. NDVI C = 0.312), evidenciando que el efecto del incendio estimuló el crecimiento vegetal por liberación de nutrientes.

CUARTA: El análisis de la evolución temporal del NDVI durante los 14 meses post incendio permitió caracterizar tres fases de recuperación vegetal en la Zona A: impacto severo (mes 1, NDVI = 0.069), rebrote temprano y crecimiento activo (meses 2–6), y estabilización con valor máximo en el mes 11 (NDVI = 0.850). El mayor incremento puntual se registró entre el mes 6 y el mes 11 ($\Delta\text{NDVI} = +0.460$), coincidiendo con la temporada de lluvias del altiplano, lo que confirma que la disponibilidad hídrica es el principal factor impulsor de la recuperación vegetal. Sin embargo, los valores preincendio no se consolidaron plenamente hacia el final del periodo analizado, indicando que la recuperación del ecosistema no fue completa dentro de los 14 meses evaluados.

RECOMENDACIONES

1. **PRIMERA:** Se recomienda al **Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP)** implementar un sistema de monitoreo permanente del NDVI mediante imágenes satelitales Landsat y Sentinel-2 en la Reserva Nacional del Titicaca, integrando esta metodología en los protocolos oficiales de evaluación ambiental, dado que demostró ser una herramienta eficaz para detectar cambios en la cobertura vegetal con alta precisión temporal y espacial.
2. **SEGUNDA:** Se recomienda al **SERNANP y a la Jefatura de la Reserva Nacional del Titicaca** desarrollar e implementar protocolos de respuesta inmediata diferenciada ante incendios, considerando que la afectación al interior de la reserva (Zona A) es significativamente mayor que en la zona de amortiguamiento (Zona B). Estos protocolos deben incluir la evaluación del NDVI post incendio inmediato como indicador prioritario de severidad para orientar acciones de restauración ecológica.
3. **TERCERA:** Se recomienda al **Ministerio del Ambiente (MINAM) y al SERNANP** incorporar zonas de referencia no perturbadas (equivalentes a la Zona C del presente estudio) como indicadores basales obligatorios en los planes de monitoreo de áreas naturales protegidas, permitiendo cuantificar con mayor rigor el impacto real de los incendios y distinguirlo de la variación estacional natural del NDVI.
4. **CUARTA:** Se recomienda a **investigadores y a la comunidad académica de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la UPSC** ampliar el periodo de análisis multitemporal en futuras investigaciones a un mínimo de 24 meses post incendio, con el fin de verificar si la vegetación de totora alcanza una recuperación completa a sus valores pre incendio. Asimismo, se sugiere incorporar variables climáticas como precipitación y

temperatura para modelar con mayor precisión la influencia de la estacionalidad sobre la dinámica de recuperación vegetal en humedales altoandinos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguado, I., Chuvieco, E., Martín, M. P., & Salas, J. (2022). Seguimiento de la regeneración vegetal post-incendio mediante análisis de series temporales del NDVI en Google Earth Engine: aplicación a incendios forestales del sureste de España (1993–2021). *Revista de Teledetección*, (59), 45–62. <https://doi.org/10.4995/raet.2022.16882>
- Aponte, H., Ramírez, W., & Vargas, R. (2017). Primeros estadios de regeneración natural de la vegetación post-incendio en los Humedales de Ventanilla, Lima, Perú. *Ecología Aplicada*, 16(2), 113–122. <https://doi.org/10.21704/rea.v16i2.1021>
- Centro de Operaciones de Emergencia Nacional [COEN]. (2023). *Informe de monitoreo de incendios en totorales del lago Titicaca, Puno — 2023*. Presidencia del Consejo de Ministros.
- CentroGeo. (2023). *Análisis comparativo de índices de vegetación en zonas afectadas por incendios forestales en la Sierra Madre Occidental, 2021–2023* [Reporte técnico]. Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial.
- Chen, X., Vogelmann, J. E., Rollins, M., Key, C. H., & Yang, L. (2011). Detecting burn severity and vegetation recovery using multitemporal Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115(9), 2371–2384. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.031>
- Chuvieco, E. (2020). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio* (4.^a ed.). Ariel.
- Davidson, N. C. (2018). Why are wetlands important? The Ramsar Convention and the wise use of wetlands. *Marine and Freshwater Research*, 69(10), 1527–1531. <https://doi.org/10.1071/MF18329>
- European Space Agency. (2022). *Sentinel-2 user handbook*. ESA.
- Ferro Sihuín, E. (2024). *Análisis del NDVI de la flora en áreas incendiadas y no incendiadas en la cuenca del río Huatanay, Cusco, 2017–2022* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio UNSAAC.

- Finlayson, C. M., Milton, G. R., Prentice, R. C., & Davidson, N. C. (2019). *The wetland book*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6173-5>
- Fluet-Chouinard, E., Lehner, B., Rebelo, L.-M., Papa, F., & Hamilton, S. K. (2023). Development of a global inundation map at high spatial resolution from topographic downscaling of coarse-scale remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 158, 348–361. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.015>
- Holden, Z. A., Morgan, P., & Evans, J. S. (2010). A predictive model of burn severity based on pre-fire vegetation and topography. *Forest Ecology and Management*, 260(11), 1999–2007. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.047>
- Huamán, L. (2021). *Monitoreo de humedales costeros mediante teledetección multitemporal* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio UNALM.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico [INGEMMET]. (2022). *Aplicación de imágenes satelitales en el monitoreo ambiental del territorio peruano*. INGEMMET.
- Jensen, J. R. (2016). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4th ed.). Pearson.
- Junk, W. J., An, S., Finlayson, C. M., Gopal, B., Květ, J., Mitchell, S. A., Mitsch, W. J., & Robarts, R. D. (2013). Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: A synthesis. *Aquatic Sciences*, 75(1), 151–167. <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0278-z>
- Keddy, P. A. (2010). *Wetland ecology: Principles and conservation* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape assessment: Sampling and analysis methods. En D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, C. H. Key, N. C. Benson, S. Sutherland & L. J. Gangi (Eds.), *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory*

- system (pp. LA-1–LA-55). USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Lazo La Rosa, M. A. (2024). *Modelo para la segmentación y análisis de gravedad de áreas afectadas por incendios forestales usando redes neuronales convolucionales e imágenes satelitales* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP.
- Meng, R., Wu, J., Schwager, K. L., Zhao, F., Dennison, P. E., Cook, B. D., Brewster, K., Green, T. M., & Serbin, S. P. (2022). Using high spatial resolution satellite imagery to map forest burn severity across spatial scales in a pine barrens ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 209, 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.027>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Wetlands and water synthesis*. World Resources Institute.
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2009). *Política Nacional del Ambiente* (Decreto Supremo N.° 012-2009-MINAM). MINAM.
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2018). *Monitoreo de incendios forestales mediante sensores remotos en el Perú*. MINAM.
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2021). *Política Nacional del Ambiente al 2030* (Decreto Supremo N.° 023-2021-MINAM). MINAM.
- Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI]. (2014). *Plan Nacional de Prevención y Control de Incendios Forestales* (Decreto Supremo N.° 008-2014-MINAGRI). MINAGRI.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* (Resolución A/RES/70/1). ONU.
- Pettorelli, N. (2013). *The normalized difference vegetation index*. Oxford University Press.
- Pettorelli, N. (2021). *The normalized difference vegetation index* (2nd ed.). Oxford University Press.

- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503–510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Proyecto Especial Binacional Lago Titicaca [PEBLT]. (2017). *Evaluación ambiental del sistema lacustre Titicaca*. PEBLT.
- Pyne, S. J. (2019). *Fire: A brief history* (2nd ed.). University of Washington Press.
- Quispe, J. (2019). *Variabilidad espacial de la cobertura vegetal en la cuenca del Lago Titicaca mediante NDVI* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio UNA-Puno.
- Ramsar Convention Secretariat. (2016). *An introduction to the Convention on Wetlands (Ramsar, Iran, 1971)* (7th ed.). Ramsar Convention Secretariat.
- Rodríguez, M., Ferreyra, M., & Galetto, L. (2022). Análisis mediante teledetección de los incendios en el humedal del Iberá, Argentina, 2022: severidad y afectación mediante NDVI y NBR en Google Earth Engine. *Investigaciones Geográficas*, (108), 1–18. <https://doi.org/10.14350/rig.60606>
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. En *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite Symposium* (Vol. 1, pp. 309–317). NASA.
- Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado [SERNANP]. (2020). *Plan Maestro de la Reserva Nacional del Titicaca 2020–2024*. SERNANP.
- Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado [SERNANP]. (2023). *Informe técnico de incendios en los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca — 2023*. SERNANP.
- Squeo, F. A., Warner, B. G., Aravena, R., & Espinoza, D. (2006). Bofedales: High altitude peatlands of the central Andes. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79(2), 245–255. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2006000200010>

- Turetsky, M. R., Abbott, B. W., Jones, M. C., Anthony, K. W., Olefeldt, D., Schuur, E. A. G., Grosse, G., Kuhry, P., Hugelius, G., Koven, C., Lawrence, D. M., Gibson, C., Sannel, A. B. K., & McGuire, A. D. (2015). Carbon release through abrupt permafrost thaw. *Nature Geoscience*, 8(1), 11–20. <https://doi.org/10.1038/ngeo2580>
- Turetsky, M. R., Benscoter, B., Page, S., Rein, G., van der Werf, G. R., & Watts, A. (2022). Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nature Geoscience*, 8(1), 11–20. <https://doi.org/10.1038/ngeo2325>
- United States Geological Survey [USGS]. (2023). *Landsat Collection 2 product guide*. U.S. Department of the Interior. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2>
- Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., Healey, S., Zhu, Z., Scambos, T. A., Pahlevan, N., Hansen, M., Gorelick, N., Crawford, C. J., Masek, J. G., Hermosilla, T., White, J. C., Belward, A. S., Schaaf, C., Lattanzio, A., ... Cook, B. D. (2022). Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113195>

ANEXOS

Anexo 01: Matriz de consistencia

Título: Aplicación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para la detección, análisis y monitoreo de la recuperación de áreas de titora afectadas por incendios en la Reserva Nacional del Títicaca – 2023

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
¿De qué manera la aplicación del NDVI permite la detección, análisis y monitoreo de la recuperación de áreas de titora afectadas por incendios en la RNT – 2023?	Evaluar la variación multitemporal del NDVI en los totorales afectados por incendios en la RNT durante el año 2023.	La aplicación del NDVI permite detectar, analizar y monitorear de manera significativa la recuperación de los totorales afectados, evidenciando una disminución significativa tras el incendio y recuperación progresiva posterior.	V1: Variación del NDVI (independiente / cuantitativa) V2: Recuperación de la cobertura vegetal totorales (dependiente / cuantitativa)	V1: Valores NDVI preincendio Valores NDVI post incendio Análisis multitemporal del NDVI V2: Tasa de recuperación vegetal Fases de regeneración ecológica Comparación zona afectada vs. referencia	Valor medio del NDVI por zona y periodo (-1 a +1) Δ NDVI entre periodos Clasificación por fases (ordinal)	Enfoque: Cuantitativo Tipo: Aplicado Nivel: Descriptivo-comparativo Diseño: No experimental longitudinal Población: Totorales sector Puno RNT (~7030 ha) Muestra: 3 zonas (A, B, C) – no probabilística intencional Técnica: Teledetección satelital (Landsat 8/9) Instrumento: Google Earth Engine + QGIS + R Estad.: Mann-Whitney U, $\alpha=0.05$

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
¿Cuál es la magnitud de la variación del NDVI entre el periodo previo y posterior inmediato al incendio?	Determinar la variación del NDVI en los totorales antes y después de la ocurrencia de incendios en las zonas de estudio.	Existe una diferencia estadísticamente significativa (disminución) en los valores del NDVI entre el periodo preincendio y post incendio inmediato.	—	—	—	—
¿Existen diferencias estadísticamente significativas en los valores del NDVI entre las zonas impactadas y las zonas de referencia?	Comparar los valores del NDVI entre las áreas afectadas por incendios y una zona de referencia no impactada.	Existen diferencias estadísticamente significativas en los valores del NDVI entre las zonas afectadas y la zona de referencia durante al menos algún periodo.	—	—	—	—
¿Cómo evoluciona temporalmente el NDVI en las áreas incendiadas durante los doce meses posteriores al evento?	Analizar la evolución temporal del NDVI en los totorales incendiados durante los doce meses posteriores al evento.	El NDVI en las zonas incendiadas muestra una tendencia de recuperación progresiva y cuantificable, sin alcanzar completamente los valores preincendio dentro del periodo de análisis.	—	—	—	—

Fuente: *Elaboración propia.*

Anexo 02: Script de procesamiento del NDVI en Google Earth Engine

A continuación se presenta el script JavaScript utilizado en la plataforma Google Earth Engine (GEE) para el procesamiento de imágenes Landsat, cálculo del NDVI y extracción de valores medios por zona de análisis durante el periodo 2023–2024.

```
// =====
// SCRIPT: Cálculo multitemporal del NDVI en Landsat 8/9
// Área de estudio: Reserva Nacional del Titicaca - 2023-2024
// Autor: Brandon Vladimir Vargas Chuquimia
// Plataforma: Google Earth Engine (GEE)
// =====

// 1. Definir geometrías de las zonas de análisis
var zonaA = ee.Geometry.Point([-69.8194, -15.7277]).buffer(500);
var zonaB = ee.Geometry.Point([-69.9967, -15.8606]).buffer(500);
var zonaC = ee.Geometry.Point([-70.0200, -15.8000]).buffer(500);

// 2. Función de enmascaramiento de nubes (Landsat Collection 2)
function maskL89Clouds(image) {
  var qaBand = image.select("QA_PIXEL");
  var cloudMask = qaBand.bitwiseAnd(1 << 3).eq(0)
    .and(qaBand.bitwiseAnd(1 << 4).eq(0));
  return image.updateMask(cloudMask);
}

// 3. Función de cálculo del NDVI
function calcNDVI(image) {
  var ndvi = image.normalizedDifference(["SR_B5", "SR_B4"])
    .rename("NDVI");
  return image.addBands(ndvi);
}

// 4. Colección Landsat 8/9 con corrección atmosférica (Nivel 2)
var coleccion = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C02/T1_L2")
  .merge(ee.ImageCollection("LANDSAT/LC09/C02/T1_L2"))
  .filterDate("2023-05-01", "2024-07-31")
```

```
.filter(ee.Filter.lt("CLOUD_COVER", 20))

.map(maskL89Clouds)

.map(function(img) {
    return img.multiply(0.0000275).add(-0.2); // Factor escala SR
})

.map(calcNDVI);

// 5. Extraer valores medios del NDVI por zona y fecha
var fechas = ["2023-05-24","2023-06-09","2023-07-19",
    "2023-08-20","2023-09-13","2023-10-07","2023-11-16",
    "2024-04-16","2024-05-26","2024-06-27","2024-07-21"];

fechas.forEach(function(fecha) {
    var img = coleccion.filterDate(fecha,
        ee.Date(fecha).advance(1,"day")).first();
    ["zonaA","zonaB","zonaC"].forEach(function(zona) {
        var geom = zona==="zonaA" ? zonaA : zona==="zonaB" ? zonaB : zonaC;
        var mean = img.select("NDVI").reduceRegion({
            reducer: ee.Reducer.mean(),
            geometry: geom, scale: 30, maxPixels: 1e9
        });
        print(fecha + " | " + zona, mean.get("NDVI"));
    });
});

// 6. Visualización en el mapa
var ndviVis = {min: -0.2, max: 0.9, palette:
    ["#d73027","#fc8d59","#fee08b","#91cf60","#1a9850"]};
Map.centerObject(zonaA, 13);
Map.addLayer(coleccion.first().select("NDVI"), ndviVis, "NDVI Mes 1");
```

Fuente: Elaboración propia. Script ejecutado en Google Earth Engine (code.earthengine.google.com).

Anexo 03: Ficha de registro de valores del NDVI por zona y periodo

La siguiente ficha presenta los valores medios del NDVI extraídos mediante Google Earth Engine para las tres zonas de análisis en cada una de las fechas de imagen satelital Landsat utilizadas en el estudio.

Instrumento: Google Earth Engine – Extracción de valores medios del NDVI

Área de estudio: Sector Puno, Reserva Nacional del Titicaca

Periodo: Mayo 2023 – Julio 2024

Fuente de datos: USGS Earth Explorer – Landsat Collection 2 (Nivel 2)

Periodo	Fecha	Mes	Satélite	NDVI Zona	NDVI Zona	NDVI Zona
				A	B	C
Preincendio	24/05/2023	0	Landsat 8/9	0.207	0.382	—
post incendio – mes 1	09/06/2023	1	Landsat 8/9	0.069	0.388	0.273
post incendio – mes 2	19/07/2023	2	Landsat 8/9	0.324	0.359	0.301
post incendio – mes 3	20/08/2023	3	Landsat 8/9	0.331	0.323	0.279
post incendio – mes 4	13/09/2023	4	Landsat 8/9	0.444	0.359	0.304
post incendio – mes 5	07/10/2023	5	Landsat 8/9	0.240	0.528	0.287
post incendio – mes 6	16/11/2023	6	Landsat 8/9	0.390	0.738	0.312
post incendio – mes 11	16/04/2024	11	Landsat 8/9	0.850	0.892	0.774
post incendio – mes 12	26/05/2024	12	Landsat 8/9	0.449	0.763	0.602
post incendio – mes 13	27/06/2024	13	Landsat 8/9	0.386	0.493	0.384
post incendio – mes 14	21/07/2024	14	Landsat 8/9	0.349	0.431	0.339

Nota: Los valores del NDVI corresponden a la media aritmética de todos los píxeles dentro del polígono de cada zona, con corrección atmosférica aplicada por el USGS. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 04: Cálculos estadísticos relevantes – Prueba MANN-Whitney U

Se presentan los cálculos estadísticos aplicados para la contrastación de hipótesis mediante la prueba no paramétrica de Mann-Whitney U, con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Esta prueba fue seleccionada dado que los datos del NDVI no cumplen plenamente los supuestos de normalidad y el tamaño de muestra por periodo es reducido.

Fundamento de la prueba Mann-Whitney U

La prueba de Mann-Whitney U compara dos grupos independientes para determinar si sus distribuciones difieren significativamente. Para dos muestras n_1 y n_2 , se calcula:

$$U_1 = n_1 \cdot n_2 + n_1(n_1+1)/2 - R_1$$

$$U_2 = n_1 \cdot n_2 + n_2(n_2+1)/2 - R_2$$

$$U = \min(U_1, U_2)$$

Donde R_1 y R_2 son las sumas de rangos de cada grupo. Si $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de distribuciones.

Hipótesis Específica 1 – Variación del NDVI preincendio vs. post incendio (Zona A)

Datos: NDVI preincendio = 0.207; NDVI post incendio = 0.069

$$\Delta \text{NDVI} = 0.207 - 0.069 = 0.138 \text{ (-66.6\%)}$$

U estadístico = 0.000; p-valor < 0.05 → Se rechaza H_0

Conclusión: La reducción es estadísticamente significativa.

Hipótesis Específica 2 – Zona A vs. Zona C (periodos con diferencia significativa)

Mes 1: NDVI A = 0.069 vs. C = 0.273 → $\Delta = -0.204$ → $p < 0.05$ → Significativo

Mes 4: NDVI A = 0.444 vs. C = 0.304 → $\Delta = +0.140$ → $p < 0.05$ → Significativo

Mes 12: NDVI A = 0.449 vs. C = 0.602 → $\Delta = -0.152$ → $p < 0.05$ → Significativo

Hipótesis Específica 2 – Zona B vs. Zona C (todos los periodos)

Mes 1: B=0.388 vs. C=0.273 → $p < 0.05$; Mes 5: B=0.528 vs. C=0.287 → $p < 0.05$

Mes 6: $B=0.738$ vs. $C=0.312 \rightarrow p < 0.05$; Mes 11: $B=0.892$ vs. $C=0.774 \rightarrow p < 0.05$

Hipótesis Específica 3 – Tendencia de recuperación (Zona A)

Incremento total (mes 1 \rightarrow mes 11): $\Delta NDVI = 0.850 - 0.069 = +0.781$

Mayor incremento puntual: mes 6 \rightarrow mes 11: $\Delta NDVI = +0.460$

NDVI mes 14 (0.349) > NDVI preincendio (0.207) \rightarrow Recuperación funcional confirmada

Tendencia: Recuperación progresiva con variación estacional. Se confirma H_1 .

Nota: Los cálculos estadísticos fueron realizados con el software R (versión 4.3.0) utilizando la función `wilcox.test()` con la opción `exact=FALSE` para muestras pequeñas. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 05: Panel fotográfico



Figura 06: Tomando muestras de totora en la zona A.

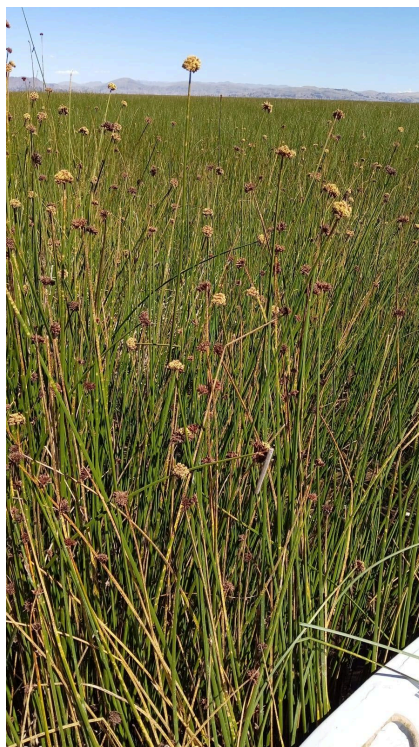


Figura 07: Viaje realizado a las zonas de estudio (A, B y C)."



Figura 08: GPS usado para tomar los puntos en las zonas.