

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE
MADRE DE DIOS**
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE



TESIS

“Monitoreo de sequía mediante índices espectrales del
satélite MODIS en un ecosistema de la Amazonía de
Madre de Dios”

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL
Y MEDIO AMBIENTE**

AUTOR:

Bachiller:

GALLEGOS LUNA, Paulina

ASESOR:

Dr. Gabriel Alarcón Aguirre

Puerto Maldonado, abril de 2026

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE
MADRE DE DIOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE**



TESIS

**“Monitoreo de sequía mediante índices espectrales del
satélite MODIS en un ecosistema de la Amazonía de
Madre de Dios”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL
Y MEDIO AMBIENTE**

AUTOR:

Bachiller:

GALLEGOS LUNA, Paulina

ASESOR:

Dr. Gabriel Alarcón Aguirre

Puerto Maldonado, abril de 2026

RST_RI_Monitoreo de sequía mediante índices espectrales del satélite MODIS en un ecosistema de la Amazonía de Madre de Dios

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unamad.edu.pe	4%
	Fuente de Internet	
2	repositorio.lamolina.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
3	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
4	www.lanot.unam.mx	1%
	Fuente de Internet	
5	Submitted to Universidad de Sevilla	1%
	Trabajo del estudiante	
6	mide.jalisco.gob.mx	1%
	Fuente de Internet	

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

Dedicatoria

Con mucho amor a mi esposo e hija por ser mi gran inspiración, mi soporte y apoyo en cada paso que desarrollo.

A todas aquellas personas; familiares y amigos que aportaron y fueron parte del proceso formativo para culminar esta etapa profesional con éxito.

Agradecimientos

A Dios por concederme vida y salud para concretar la culminación del presente estudio.

Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo por permitirme acceder a este beneficio el cual me esforcé y busqué la oportunidad para lograr ser parte de este programa.

A mi alma mater y los docentes que formaron parte de mi trayecto profesional y transmitieron sus enseñanzas teórico-práctico en los 5 años de estudio; cada uno de ellos significo un pilar fundamental.

Se agradece al asesor de la presente tesis Dr. Gabriel Alarcón Aguirre por su gran labor en la orientación y mentoría en el desarrollo de la misma.

Resumen

El estudio tuvo como objetivo utilizar índices espectrales del satélite MODIS para monitorear las condiciones de sequía en un ecosistema de la provincia de Tambopata en la Amazonia de Madre de Dios, durante un período de veinte años (2004-2024). Se analizaron el comportamiento del Índice Diferencial Normalizado de Sequía (NDDI), el Índice Multibanda Normalizado de Sequía (NMDI) y el Índice de Salud de la Vegetación (VHI) durante la estación seca (junio a septiembre). Los resultados mostraron que el NDDI y el VHI son índices útiles y fiables para el monitoreo de sequías en la Amazonía de Tambopata. Las series temporales determinaron una alta sensibilidad, con periodos de estrés hídrico marcados años con alta sequías, como el fenómeno de El Niño de 2015-2016, así como en los años 2005, 2010, 2020 y 2021. Los niveles de agua superficial mostraron una humedad en la provincia, cientos de miles de hectáreas se clasificaron en las categorías de Sequía Leve y Estrés/Normal, con picos de sequía severa en años más secos. Las precisiones del NDDI (73–78% y Kappa 0,67–0,73) y del VHI (70–72% y Kappa 0,63–0,67) mostraron una concordancia considerable con las imágenes de Landsat, demostrando que son buenos para clasificar la sequía. El NMDI, por otro lado, no fue eficiente. Su serie temporal fue casi horizontal, sin ninguna variabilidad, donde el 100% de la provincia fue clasificada como Alta humedad. Aunque su precisión estadística fue casi perfecta (91-94% y Kappa 0,82-0,88), ello se debe a la clasificación monótona, y no a su capacidad para discriminar la sequía. En conclusión, el NDDI y el VHI presentaron mejores respuestas para la alerta temprana y la gestión del riesgo de sequía en la provincia de Tambopata, proporcionando información útil sobre la extensión y la severidad del estrés hídrico.

Palabras clave: Índice Diferencial Normalizado de Sequía (NDDI), Índice Multibanda Normalizado de Sequía (NMDI), Índice de Salud de la Vegetación (VHI), estrés hídrico, salud de la vegetación.

Abstract

The study aimed to use spectral indices from the MODIS satellite to monitor drought conditions in an ecosystem in the Tambopata province of the Madre de Dios Amazon, over a twenty-year period (2004-2024). The behavior of the Normalized Difference Drought Index (NDDI), the Normalized Multiband Drought Index (NMDI), and the Vegetation Health Index (VHI) were analyzed during the dry season (June to September). The results showed that the NDDI and VHI are useful and reliable indices for monitoring droughts in the Tambopata Amazon. Time series analysis revealed high sensitivity, with periods of marked water stress in years with severe droughts, such as the 2015-2016 El Niño phenomenon, as well as in 2005, 2010, 2020, and 2021. Surface water levels showed moisture in the province; hundreds of thousands of hectares were classified in the categories of Mild Drought and Stress/Normal, with peaks of severe drought in drier years. The accuracies of the NDDI (73–78% and Kappa 0.67–0.73) and the VHI (70–72% and Kappa 0.63–0.67) showed considerable agreement with Landsat imagery, demonstrating that they are good for classifying drought. The NMDI, on the other hand, was not efficient. Its time series was almost horizontal, without any variability, where 100% of the province was classified as high humidity. Although its statistical accuracy was almost perfect (91-94% and Kappa 0.82-0.88), this is due to the monotonous classification, and not to its ability to discriminate drought. In conclusion, the NDDI and VHI showed better responses for early warning and drought risk management in the Tambopata province, providing useful information on the extent and severity of water stress.

Key words: Normalized Difference Drought Index (NDDI), Normalized Multiband Drought Index (NMDI), Vegetation Health Index (VHI), water stress, vegetation health.

Índice de contenidos

	Pág.
Dedicatoria.....	
Agradecimientos	
Resumen	
Abstract.....	
Introducción	
CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Formulación del problema.....	3
1.2.1 Problema general.....	3
1.2.2 Problemas específicos	3
1.3 Objetivos de la investigación.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Variables de la investigación.....	4
1.4.1 Identificación de variables.....	4
1.5 Operacionalización de variables	4
1.6 Hipótesis	6
1.7 Justificación e importancia	7
1.8 Consideraciones éticas	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Antecedentes de la investigación	9
2.1.1 Alcance internacional	9
2.1.2 Alcance nacional	13

2.1.3 Alcance local.....	15
2.2 Base teórica	17
2.2.1 Bosque.....	17
2.2.2 Bosque Amazónico tropical.....	17
2.2.3 Estrés hídrico	17
2.2.4 Sequia.....	18
2.2.5 Principios básicos de teledetección	18
2.2.5.1 Onda electromagnética	19
2.2.5.2 Espectro electromagnético.....	19
2.2.5.3 Bandas espectrales	20
2.2.6 Teoría de índices de sequía y salud vegetal.....	21
2.2.6.1 Índice de salud vegetativa (VHI)	21
2.2.6.2 Índice de sequia de diferencia normalizada (NDDI).....	22
2.2.6.3 Índice de sequia multibanda normalizado (NMDI)	23
2.2.7 Sensor MODIS.....	23
2.3 Definición de términos	24
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	26
3.1 Tipo de estudio	26
3.2 Diseño del estudio	26
3.3 Delimitación espacial y temporal.....	26
3.4 Población y muestra	28
3.5 Método y técnicas	31
3.6 Tratamiento de datos	33
3.6.1 Procesamiento de datos	33
3.6.2 Estadística aplicada y precisión de datos clasificados.....	39
3.6.3 Análisis estadístico	40

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1 Serie temporal del Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI), Índice de Salud de la Vegetación (VHI) e Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI).....	41
4.2 Comparación de índices	59
4.3 Evaluación de precisión	63
CONCLUSIONES	67
SUGERENCIAS.....	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXOS.....	78

Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de variables	5
Tabla 2. Distribución de muestras por índice	29
Tabla 3. Datos MODIS utilizados en el estudio.....	34
Tabla 4. Valores del coeficiente kappa	39
Tabla 5. Superficie por tipo de categoría de NDDI.....	55
Tabla 6. Superficie por tipo de categoría de NMDI	56
Tabla 7. Superficie por tipo de categoría de VHI	57
Tabla 8. Precisión de NDDI con imágenes Landsat.....	63
Tabla 9. Precisión de NMDI con imágenes Landsat	65
Tabla 10. Precisión de VHI con imágenes Landsat	65

Índice de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Localización de área de estudio.	27
<i>Figura 2.</i> Imágenes de satélite MODIS (MOD09A1).	29
<i>Figura 3.</i> Puntos de muestreo del Índice de Sequía de Diferencia Normalizada (NDDI).	30
<i>Figura 4.</i> Puntos de muestreo del Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI).	30
<i>Figura 5.</i> Puntos de muestreo del Índice de Salud de la Vegetación (VHI) .	30
<i>Figura 6.</i> Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI) de 2004-2013 (06-09), Tambopata.	43
<i>Figura 7.</i> Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI) de 2014-2023 (06-09), Tambopata.	44
<i>Figura 8.</i> Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI) de 2024 (06-09), Tambopata.	45
<i>Figura 9.</i> Serie temporal del Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI) de 2004-2024 (06-09), Tambopata.	45
<i>Figura 10.</i> Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI) de 2004-2024 (06-09), Tambopata.	47
<i>Figura 11.</i> Serie temporal del Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI) de 2004-2024 (06-09), Tambopata.	48
<i>Figura 12.</i> Índice de Salud de la Vegetación (VHI) de 2013-2022 (06-09), Tambopata.	51
<i>Figura 13.</i> Índice de Salud de la Vegetación (VHI) de 2023 (06-09), Tambopata.	52
<i>Figura 14.</i> Índice de Salud de la Vegetación (VHI) de 2024 (06-09), Tambopata.	52

<i>Figura 15.</i> Serie temporal del Índice de Salud de la Vegetación (VHI) de 2013-2024 (06-09), Tambopata.	53
<i>Figura 16.</i> Tendencia de la superficie por categoría de NDDI de 2004-2024, Tambopata.....	55
<i>Figura 17.</i> Tendencia de la superficie por categoría de NDDI (Alta humedad) de 2004-2024, Tambopata.....	56
<i>Figura 18.</i> Tendencia de la superficie por categoría de VHI de 2004-2024, Tambopata.....	58

Índice de anexos

	Pág.
Anexo 1. Matriz de consistencia,	
Anexo 2. Puntos de muestreo distribuidos al azar por clases en el área de estudio para NDDI.	
Anexo 3. Puntos de muestreo distribuidos al azar por clases en el área de estudio para NMDI.	
Anexo 4. Puntos de muestreo distribuidos al azar por clases en el área de estudio para VHI.	
Anexo 5. Precisión del Índice de sequía de Diferencia Normalizada (NDDI).	
Anexo 6. Precisión del Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI).....	
Anexo 7. Precisión del Índice de Salud de la Vegetación (VHI).....	

Introducción

La sequía es un desastre natural que aumenta en intensidad durante un largo período de tiempo y tiene consecuencias de gran alcance (Zormand et al. 2017; Angearu et al. 2020; Jayawardhana y Chathurange 2020; Alahacoon y Edirisinghe 2022; Tran et al. 2023). La sequía, en particular, puede tener un efecto devastador en los bosques, plantaciones, la agricultura, el suministro de agua, la energía y el medio ambiente, transformándose en costosos desastres naturales (Gulácsi y Kovács 2015; Aksoy et al. 2019). Los investigadores y científicos han llegado a varias definiciones de sequía, pero los denominadores comunes para todas estas definiciones son la sequedad y la escasez de agua (Rahimzadeh Bajgiran et al. 2009; Shahabfar et al. 2012; Gulácsi y Kovács 2015; Zormand et al. 2017; Aksoy et al. 2019; Sur et al. 2019; Angearu et al. 2020; Dobri et al. 2021).

En los últimos años, la teledetección se ha utilizado en gran medida para predecir la gravedad de la sequía, mejorando los inconvenientes de los enfoques tradicionales en relación con el costo, el tiempo y la distribución espacial. Los índices de vegetación derivados de imágenes satelitales se utilizan para el monitoreo de sequías. El Índice de Condición de Vegetación (VCI) es derivado por Kogan (1995b) con el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que es uno de los índices más utilizados para observaciones de vegetación. Después de eso, el Índice de Salud de Vegetación es una combinación del Índice de Condición de Temperatura (TCI) derivado de la Temperatura de Superficie Terrestre (LST) y VCI se utiliza para aplicaciones de monitoreo de sequía. Otro índice derivado de los índices de vegetación para el monitoreo de sequías es el Índice de Sequía de Diferencia Normalizada (NDDI) planteada por Gu et al. (2007). Asimismo, el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) fue desarrollado por Gao (1996) para determinar el contenido de agua en las plantas. El Índice de Sequía Multibanda Normalizada (NMDI) usa diferencias de canales de absorción de agua de 1640 nm y 860 nm para determinar la sensibilidad del suelo y la vegetación y usa un canal de referencia a 860 nm como NDWI (Wang y Qu 2007). Gracias a estos índices o sus combinaciones, se puede llegar a

información sobre diversidad vegetal, cantidades de planta y suelo, valores de temperatura del área de estudio, información de sequía (Gulácsi y Kovács 2015; Aksoy et al. 2019).

Con el lanzamiento de la plataforma Google Earth Engine (GEE), una plataforma de computación en la nube para almacenar y procesar conjuntos de datos geográficos, es más fácil crear mapas multitemporales o realizar análisis de series temporales utilizando las imágenes satelitales disponibles en la plataforma, su capacidad de procesamiento y su enfoque de codificación (Aksoy et al. 2019; Mutanga y Kumar 2019; Jayawardhana y Chathurange 2020; Alahacoon y Edirisinghe 2022; Shamloo et al. 2022; Tran et al. 2023; Zhu et al. 2024). El monitoreo de sequías requiere datos a largo plazo y una buena cobertura de la región expuesta a condiciones de sequía. La plataforma GEE proporciona herramientas viables y datos geospaciales extensos que se adaptan muy bien a los propósitos de monitoreo de sequías.

El estudio se divide en cuatro capítulos:

En el Capítulo I describe problema de investigación, enfocándose en la formulación del problema, los objetivos, variables, hipótesis y justificación.

El Capítulo II comprende los antecedentes y la revisión de la literatura, que trata sobre el contexto histórico de la sequía en la Amazonía y el marco teórico de la teledetección y los índices espectrales.

En el Capítulo III, aborda la metodología de la investigación, elaborando sobre proceso de trabajo de adquisición de datos MODIS a través de GEE, el cálculo de índices y la validación de precisión (Coeficiente Kappa).

El Capítulo IV contiene los resultados y la discusión, que proporcionan el análisis de series temporales, mapas de clasificación de sequías, mapas de índices y la validación.

Termina con las conclusiones que surgen de los hallazgos de la investigación junto con las sugerencias para futuras investigaciones.

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción del problema

La sequía, una anomalía climática que se origina en un período de precipitaciones generalmente bajas, puede producirse en cualquier parte de la superficie de la Tierra, incluso en las regiones húmedas (Tran et al. 2017; Tran et al. 2023). Las sequías pueden alterar los sistemas ecológicos y económicos, provocando desplazamientos de población. Además, la sequía sostenida también fomenta la desertificación y la degradación de la tierra, que son especialmente perjudiciales para los paisajes vulnerables (Tran et al. 2017; Zormand et al. 2017; Aksoy et al. 2019; Angearu et al. 2020; Wei et al. 2021; Alahacoon y Edirisinghe 2022; Mikaili y Rahimzadegan 2022; Tran et al. 2023). Cuando se dispone de datos meteorológicos climáticos locales, la sequía se puede medir utilizando índices integrados relacionados con las condiciones climáticas y del suelo, como la humedad atmosférica, la temperatura del aire, las precipitaciones y la humedad del suelo (Gu et al. 2007; Du et al. 2013; Tran et al. 2017; Zormand et al. 2017; Angearu et al. 2020; Jayawardhana y Chathurange 2020; Wei et al. 2021; Mikaili y Rahimzadegan 2022; Tran et al. 2023).

Aunque los datos meteorológicos definen el estado de sequía, no son totalmente suficientes, especialmente en áreas que carecen de registros sólidos, sostenidos y adecuados en escalas espaciales y temporales apropiadas. Este estudio examina las condiciones de sequía dentro de una región Amazónica, pero distintiva, la zona central de la región de Madre de Dios, una región que cuenta con escasas estaciones meteorológicas y donde la información no es de acceso abierto (Gulácsi y Kovács 2015; Mohd-Razali et al. 2016; Aksoy et al. 2019).

Sin embargo, las imágenes satelitales secuenciales pueden constituir un método integral para observar y evaluar las condiciones de sequía en regiones con escasas de estaciones y de datos climáticos sistemáticos. Existen múltiples formas de imágenes obtenidas por teledetección disponibles de forma gratuita que son adecuadas para el análisis de sequías, como las imágenes MODIS, LANDSAT y ASTER, que juntas proporcionan una amplia gama de resoluciones y canales espectrales. Estos datos se pueden aplicar a la evaluación del uso del suelo, o para generar índices útiles para propósitos específicos, como los cambios de temperatura superficial y la salud de la vegetación, que pueden considerarse indicadores de sequía (Gao 1996; Gu et al. 2007; Wang y Qu 2007; Rahimzadeh Bajgiran et al. 2009; Gulácsi y Kovács 2015; Mohd-Razali et al. 2016; Zormand et al. 2017; Aksoy et al. 2019).

El monitoreo de la sequía basado en teledetección a menudo depende de varios índices de teledetección, por ejemplo, los índices que reflejan el estrés hídrico en las hojas de la vegetación o la temperatura del dosel, como el índice de estrés hídrico (MSI), el índice hídrico (WI), el índice hídrico de diferencia normalizada (NDWI), el índice global de humedad de la vegetación (GVMI), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de condición de la vegetación (VCI), el índice de proporción de vegetación (RVI) y el ARVI (índice de vegetación atmosféricamente resistente) que se emplean comúnmente (Gao 1996; Gu et al. 2007; Zormand et al. 2017; Aksoy et al. 2019). Por lo tanto, la evaluación del desempeño de los índices de teledetección existentes en el monitoreo de la sequía se ha convertido en situaciones clave en la investigación de índices de teledetección en el monitoreo de la sequía (Mohd-Razali et al. 2016; Aksoy et al. 2019; Dobri et al. 2021; Zhu et al. 2024). La evaluación de las capacidades de los índices de teledetección existentes en el monitoreo de la sequía a menudo se basa en conjuntos de datos donde se calculan varios índices de teledetección de la forma más exhaustiva posible, seguido del análisis de la correlación entre estos índices y otros indicadores existentes de sequía, como los índices de sequía meteorológica y la humedad del suelo (Gu et al. 2007; Mohd-Razali et

al. 2016; Aksoy et al. 2019; Dobri et al. 2021; Zhu et al. 2024). Por lo tanto, un análisis sistemático de la ocurrencia, la gravedad y el impacto de las sequías es un enfoque científico que es muy importante en la Amazonia de Madre de Dios.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuáles y como son las condiciones de sequía mediante índices espectrales del satélite MODIS en un ecosistema de la provincia de Tambopata, Amazonia de Madre de Dios durante un período de veinte años (2004-2024)?

1.2.2 Problemas específicos

P.E.1 ¿Cuáles son las series temporales del Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI), Índice de Salud de la Vegetación (VHI) e Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI) en un ecosistema de la provincia de Tambopata durante un periodo de veinte años (2004-2024)?

P.E.2 ¿Cuál es el comportamiento de la efectividad temática y precisión de los índices espectrales (NDDI, VHI y NMDI) en un ecosistema de la provincia de Tambopata, evaluando la robustez de cada índice durante un periodo de veinte años (2004-2024)?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Monitorear las condiciones de sequía mediante índices espectrales del satélite MODIS en un ecosistema de la provincia de Tambopata, Amazonia de Madre de Dios durante un período de veinte años (2004-2024).

1.3.2 Objetivos específicos

O.E.1 Determinar la serie temporal del Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI), Índice de Salud de la Vegetación (VHI) e Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI) en un ecosistema de la provincia de Tambopata durante un periodo de veinte años (2004-2024).

O.E.2 Comparar la efectividad temática y precisión de los índices espectrales (NDDI, VHI y NMDI) en un ecosistema de la provincia de Tambopata, evaluando la robustez de cada índice durante un periodo de veinte años (2004-2024).

1.4 Variables de la investigación

1.4.1 Identificación de variables

Variable Dependiente: Condiciones de sequía en un ecosistema de la Amazonia de Madre de Dios en un periodo de veinte años (2004-2024).

Variable Independiente: Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI), Índice de Salud de la Vegetación (VHI) e Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI).

1.5 Operacionalización de variables

Las variables y su operacionalización de detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Operacionalización de variables

Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Ítems
Variable independiente				
Los índices espectrales permiten determinar las condiciones de sequía en un ecosistema de la provincia de Tambopata durante un periodo de veinte años (2004-2024).	Determinar la serie temporal del Índice de sequía en un ecosistema de la provincia de Tambopata.	Condiciones de sequía en un ecosistema de la provincia de Tambopata.	<p>Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI). Los valores NDDI se clasificaron en ocho categorías: Sequía Extrema (< -0,30), Sequía Severa (-0,30 a -0,20), Sequía Moderada (-0,20 a -0,10), Sequía Ligera (-0,10 a 0,00), Normal / Transición (0,00 a 0,10), Humedad Ligera (0,10 a 0,20), Humedad Moderada (0,20 a 0,30), Alta Humedad (> 0,30).</p> <p>Índice de Salud de la Vegetación (VHI). Estas clases son: Sequía Extrema (0-10), Sequía Severa (10-20), Sequía Moderada (20-30), Sequía Ligera (30-40), Estrés / Normal (40-60), Normal a Saludable (60-70), Saludable (70-80), Muy Saludable (80-90), Excelente Salud (90-100)</p> <p>Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI). Los valores NMDI se clasifican en 4 tipos diferentes como: Sequía Severa (< -0,20), Sequía Moderada (-0,20 a -0,10), Sequía Ligera (-0,10 a 0,00), Normal a</p>	Problema específico 1

			Ligeramente Húmedo (0,00 a 0,10), Humedad Moderada (0,10 a 0,20), Alta Humedad (> 0,20).	
	Comparar los índices de sequía en un ecosistema de la provincia de Tambopata.	Comparar las condiciones de sequía en un ecosistema de la provincia de Tambopata.	Diferencias en la estimación de sequía con NDDI, VHI y NMDI.	Problema específico 2
Variable dependiente				
Los índices espectrales del satélite MODIS permiten monitorear las condiciones de sequía en un ecosistema de la provincia de Tambopata, Amazonia de Madre de Dios durante un período de veinte años (2004-2024).	Monitorear las condiciones de sequía mediante índices espectrales del satélite MODIS en un ecosistema de la provincia de Tambopata.	Condiciones de sequía por tipo de índice espectral en un ecosistema de la provincia de Tambopata.	Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI). Índice de Salud de la Vegetación (VHI). Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI).	Problema específico 1 y 2

1.6 Hipótesis

Hipótesis nula (H₀): El índice de diferencia de sequía normalizado (NDDI) y el índice de salud de la vegetación (VHI) no responden mejor y de manera diferente que el índice de sequía multibanda normalizado (NMDI) en relación con los efectos del estrés por sequía en un ecosistema en la provincia de Tambopata durante el período de 20 años (2004-2024).

Hipótesis alterna (H₁): El índice de diferencia de sequía normalizado (NDDI) y el índice de salud de la vegetación (VHI) responden mejor y de manera diferente que el índice de sequía multibanda normalizado (NMDI) en relación con los efectos del estrés por sequía en un ecosistema en la provincia de Tambopata durante el período de 20 años (2004-2024).

1.7 Justificación e importancia

La Amazonía peruana es crucial para el clima del planeta y, como tal, es sensible a los impactos de la sequía (Gao 1996; Gu et al. 2007). ¿Cómo entendemos y monitoreamos estas transiciones?, esta pregunta forma el marco teórico de esta investigación, ya que la literatura sobre el monitoreo de sequías en la Amazonia se ha centrado en índices meteorológicos (Mohd-Razali et al. 2016; Aksoy et al. 2019). Esta investigación avanza en la teoría de la teledetección de ecosistemas complejos al analizar las características espectrales de respuesta y los índices de sequía disponibles NDDI, NMDI y VHI dentro de 20 años para la provincia de Tambopata. Con respecto a estos índices de sequía, se evalúa el rendimiento de cada índice para determinar qué combinación de bandas espectrales NIR, SWIR y LST proporciona la mejor señal para el monitoreo del estrés hídrico del dosel para lograr la menor saturación de señal en el dosel de prueba anterior. Este trabajo avanza en la comprensión en la sensibilidad de los índices en los bosques Amazónicos.

El uso de datos y su validación asegura el tratamiento metodológico del estudio, la plataforma GEE sirve para superar limitaciones de costo y distribución espacial de enfoques basados en tierra (Alahacoon y Edirisinghe 2022) para procesar series extensas de MODIS durante un largo período que abarca de 2004 a 2024. La validación de la precisión a través del Coeficiente Kappa, al contrastar imágenes clasificadas de MODIS con imágenes de referencia de Landsat, proporciona una metodología robusta y controles estadísticos para la toma de decisiones.

Socialmente, este estudio tiene una gran importancia debido a su enfoque práctico para evaluar el riesgo. Las consecuencias de la sequía en la Amazonía no se restringen a los árboles; la sequía también conduce a la degradación y deforestación con graves consecuencias para la biodiversidad y la economía local (Kogan 1995a; Shahabfar y Eitzinger 2011; Shahabfar et al. 2012). Mejorar los sistemas existentes de vigilancia y alerta temprana es crítico para aliviar estas consecuencias. Esta investigación desarrolla una herramienta validada y precisa (NDDI y VHI) para instituciones de gestión de riesgos (como SENAMHI) y agencias de conservación en Madre de Dios. La

identificación de los índices más robustos agiliza la planificación involucrada en la Adaptación al Cambio Climático, la gestión sostenible de recursos hídricos y la mitigación proactiva del riesgo de desastres. Esto mejora la seguridad ecológica al reducir los costos socioeconómicos de la sequía en una de las regiones más vulnerables del mundo.

1.8 Consideraciones éticas

El proceso de elaboración y desarrollo de la tesis se enmarcó en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

Se muestra fehacientemente los resultados de la aplicación de los Índices de sequía de diferencia normalizada (NDDI), Índice de Salud de la Vegetación (VHI) e Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI) para medir la respuesta al estrés por sequía en un ecosistema de la provincia de Tambopata durante de veinte años (2004-2024).

El método del estudio fue impartido por especialistas del Centro de Teledetección para el Estudio y Manejo de Recursos Naturales (CETEGERN) de la UNAMAD.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Alcance internacional

Alahacoon y Edirisinghe (2022) estudiaron los índices de sequía utilizados en el seguimiento de la sequía meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica. Los índices de sequía se han introducido como un enfoque importante para los cálculos cuantitativos y cualitativos de la gravedad y el impacto de la sequía. En este estudio se revisaron 111 índices de sequía, que se dividen en dos categorías: tradicional (específico de la ubicación/modelo) y teledetección (RS). De los 111 índices, 44 pertenecen a los índices tradicionales y 67 a la sección RS. Este estudio muestra que el monitoreo de la sequía meteorológica tiene el número más alto (22) de índices tradicionales, alrededor del 20% en general, mientras que el monitoreo de la sequía agrícola más bajo (7) es del 6,3%. La especialidad es que, al considerar los índices de sequía basados en la teledetección, el 90% se utiliza para el monitoreo de sequías agrícolas y el 10% para el monitoreo de sequías hidrológicas y meteorológicas. Sin embargo, el estudio encontró que los avances en la tecnología satelital han acelerado el diseño de nuevos índices de sequía y que la sustitución de los datos tradicionales específicos de la ubicación con la observación por satélite facilita el cálculo de una mayor distribución espacial y resolución.

Mikaili y Rahimzadegan (2022) investigaron el desempeño de los índices de vegetación satelital para monitorear la sequía agrícola a escala local. En este sentido, se utilizaron imágenes satelitales que incluyen datos del Espectrómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) y del Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR) para evaluar la cubierta vegetal y sus efectos de cambios graduales en la sequía agrícola. La

provincia de Fars en Irán con valores de precipitación relativamente bajos fue seleccionada como ubicación del estudio. El Índice de Sequía Perpendicular Modificado (MPDI), MPDI1, Índice de Condición de la Vegetación (VCI), Anomalías del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVIA) e Índice de Vegetación Estandarizado (SVI), se evaluaron para seleccionar el índice basado en teledetección con el mejor desempeño en el monitoreo de la sequía. El desempeño de dichos índices se investigó durante 13 años (2000-2013) para MODIS y 29 años (1985-2013) para AVHRR. Para evaluar la eficiencia de los índices satelitales en la investigación de sequías, se utilizaron datos del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) de cinco estaciones seleccionadas para períodos de 3, 6 y 9 meses en agosto. Los resultados mostraron que los índices de vegetación basados en NDVI tuvieron la correlación más alta con SPI en clima frío y escala de tiempo de largo plazo (6 y 9 meses). Los valores de correlación más altos entre los índices basados en teledetección y SPI se adquirieron, respectivamente, en escalas de tiempo de 9 y 6 meses, con valores de 43,5% y 40%. Además, VCI mostró la mayor capacidad para la investigación de sequías agrícolas en diferentes regiones climáticas del área de estudio. En general, los resultados demostraron que los índices basados en NDVI pueden usarse para el monitoreo y evaluación de sequías en una escala de tiempo de largo plazo en una escala de tiempo local.

Wei et al. (2021) construyeron diferentes índices de sequía basados en datos de teledetección de múltiples fuentes y evaluamos y comparamos exhaustivamente su aplicabilidad para el monitoreo de sequías en toda China. Las características de los eventos de sequía en 2009 y 2011 se compararon utilizando varios índices de sequía. Las diferentes escalas de tiempo del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) y el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) se utilizaron para evaluar los índices de sequía de teledetección en diferentes regiones. Se analizaron y compararon índices de sequía individuales, incluido el índice de condición de la vegetación (VCI), el índice de condición de temperatura (TCI) derivado de los datos del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS), el índice de condición de precipitación (PCI) derivado de los datos de la Misión de

medición de lluvia tropical (TRMM), y el TCI y el índice de condición de humedad del suelo (SMCI) derivados de los datos del radiómetro de escaneo de microondas avanzado para el sistema de observación de la Tierra (AMSR-E), así como índices de sequía combinados, incluido el índice de sequía integrado de microondas (MIDI), el índice de sequía de vegetación optimizado (OVDI), el índice de sequía meteorológica optimizado (OMDI), el índice de condiciones de sequía a escala (SDCI) y el índice de sequía sintetizado (SDI), para evaluar su aplicabilidad. Los resultados mostraron que diferentes índices de sequía tienen características específicas bajo diferentes tipos de uso de la tierra en China. El VCI y el TCI pueden monitorear mejor las condiciones de sequía a largo plazo, pero tienen una correlación débil con el índice de sequía in situ en áreas de bosques y pastizales. La correlación del SPI-1 con el PCI es mayor que la de otros índices individuales, lo que indica que el PCI es un buen índice de sequía a corto plazo. El SMCI tiene una mejor correlación con el índice de sequía in situ a corto plazo, pero no es propicio para el seguimiento de la sequía en zonas como tierras densamente forestadas y pastizales. Las correlaciones del índice de sequía in situ con los índices de sequía combinados (MIDI, OVDI, OMDI, SDCI y SDI) son mejores que las de los índices de sequía individuales.

Aksoy et al. (2019) analizaron la distribución espacio-temporal de las condiciones de sequía en Turquía desde febrero de 2000 hasta enero de 2019 utilizando diferentes índices de sequía producidos a partir de datos satelitales MODIS en la plataforma GEE. Se utilizaron mapas del Índice de Salud de la Vegetación (VHI), el Índice de Sequía Multibanda Normalizado (NMDI) y el Índice de Sequía de Diferencia Normalizada (NDDI) a nivel de país para diferentes años y meses de los años relacionados para evaluar las condiciones de sequía. También se crearon series temporales para algunas ubicaciones específicas para analizar en profundidad las condiciones de sequía en un período de 20 años. Nuestros resultados muestran que los índices de sequía derivados de MODIS proporcionan información geoespacial útil para evaluar las condiciones de sequía a nivel de país. Además, la plataforma GEE es una herramienta muy útil y rápida para acceder a

imágenes satelitales relacionadas y realizar análisis de teledetección de datos enormes y de largo plazo de manera eficiente. En esta plataforma se podrá acceder y procesar con éxito grandes datos geoespaciales no sólo para el monitoreo de sequías sino también para otras aplicaciones de monitoreo ambiental.

Zormand et al. (2017) evaluaron el potencial de los índices de teledetección, incluido el índice de sequía perpendicular (PDI), el índice de sequía perpendicular modificado (MPDI) y el índice de sequedad de la vegetación por temperatura (TVDI), en el monitoreo de la sequía en el noreste de Irán durante 2003-2013. Los índices mencionados se extrajeron de 254 imágenes MODIS corregidas atmosféricamente, y su precisión se determinó en comparación con los datos de humedad del suelo y también el índice de precipitación estandarizado (SPI) a escalas mensuales y anuales. El SPI de 1, 3, 6, 9 y 12 meses se obtuvo de 42 estaciones meteorológicas. Según los resultados, aunque los índices de sequía derivados de MODIS tuvieron diferentes eficiencias en diferentes escalas de tiempo, en general pudieron reflejar mejor las condiciones de sequía a escala anual en comparación con la escala mensual. En la escala mensual, el PDI, el MPDI y el TVDI tuvieron las mayores correlaciones con el SPI durante los períodos de 6, 9 y 3 meses que terminaron en febrero, septiembre y abril (-0,60, -0,69 y -0,43, respectivamente). En la escala anual, el PDI, el MPDI y el TVDI tuvieron los coeficientes de correlación más fuertes con el SPI de 6, 6 y 3 meses en 2012 (-0,95), 2012 (-0,96) y 2007 (-0,72), respectivamente. Además, las altas correlaciones (>80%) entre los índices de sequía derivados de MODIS y los datos de humedad del suelo reflejaron su potencial en el mapeo de la humedad del suelo. Considerando el desempeño constante del MPDI en diferentes escalas de tiempo, este índice puede utilizarse como una alternativa adecuada al SPI en el mapeo y monitoreo de la sequía agrícola en áreas áridas y semiáridas donde el SPI enfrenta ciertas limitaciones.

Mohd-Razali et al. (2016) estudiaron cuatro años de datos de reflectancia superficial del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) para desarrollar índices espectrales de vegetación, disponibilidad de

agua y estrés hídrico para Malasia peninsular. Los índices, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, el Índice de Diferencia Hídrica Normalizada y el Índice de Estrés Hídrico, se aplicaron a los tres hábitats diferentes para monitorear la sequía y desarrollar una clasificación del monzón del suroeste de Malasia (M-SWM). Al integrar los indicadores del monzón del sudoeste, el índice de precipitación estándar, la precipitación media y la temperatura y el análisis de correlación de los índices espectrales, la clasificación M-SWM mostró una mayor sensibilidad a las condiciones de sequía que cualquiera de los indicadores individuales por separado. Los resultados también revelaron que julio es el mes más seco; fue el único período clasificado como "Muy Seco" según el M-SWM.

Swain et al. (2011) estudiaron datos de series de tiempo acumulativas de LST y NDVI de Terra-MODIS de ocho días para analizar las respuestas de los tipos de cobertura de cultivos y pastizales a la sequía en Nebraska. Se seleccionaron cuatrocientos noventa píxeles de 1 km que incluían maíz y soja irrigados y no irrigados y tres tipos de cobertura de pastizales en todo el estado de Nebraska. Los análisis estadísticos revelaron que la mayoría de los píxeles de la cobertura del suelo experimentaron LST diurnos y nocturnos significativamente más altos y un NDVI más bajo durante la temporada de crecimiento del año de sequía ($p < 0.01$). Entre los tipos de cobertura del suelo analizados, los pastizales experimentaron el mayor aumento en el LST diurno y la disminución en el NDVI.

2.1.2 Alcance nacional

Martínez-Castro (2024) estimó la precipitación y la evapotranspiración aplicando el déficit hídrico compuesto medio (MCWD) y su anomalía relativa (rMCWD) para cuantificar la gravedad y la extensión espacial de las sequías. El estudio es pionero en estudiar los períodos de sequías extremas en la Amazonía peruana utilizando bases de datos satelitales como ERA5, CHIRPS y MSWEP desde 2000 hasta 2023. Se afirmó que del 37 al 51% de la cuenca Amazónica peruana fue "moderadamente afectada" por sequía en 2005 y para 2010 esta área "aumentó" al 52-74% debido a incrementos sustanciales en el

área de sequías extremas y severas. Los períodos de sequía extremadamente severos son los años hidrológicos 2004-2005, 2009-2010 y 2022-2023, y los períodos moderadamente secos son 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008 y 2015-2016. La variabilidad del índice rMCWD atribuida a diferentes conjuntos de datos de precipitación suma el 21% para los conjuntos de datos de precipitación, el 59% para los conjuntos de índices de sequía y el 20% para los conjuntos de datos de evapotranspiración, intentando caracterizar el fenómeno como incertidumbre algorítmica.

Villanueva-Baca (2022) evaluaron las sequías y las heladas son los principales factores climáticos que limitan la producción de café. En este sentido, la teledetección apoya en el conocimiento de las tendencias del cambio climático en tiempo y espacio. Por lo tanto, este estudio se abocó a analizar la dinámica temporal y espacial del Índice de Vegetación Estandarizado (SVI), con datos históricos promediados durante 23 años. El estudio se realizó en tres provincias cafetaleras de la Amazonía. En la metodología se usó el producto MOD13Q1 V6 del MODIS, que se encuentra en la GEE, para crear mapas del Índice Estandarizado de Vegetación. Se utilizó el software ArcGIS para crear las escalas de sequía. Se determinó que en 23 años de datos se presentaron sequías extremas de hasta -1,413 SVI en octubre de 2007 en Rodríguez de Mendoza y -1,453 SVI en diciembre de 2016 en Utcubamba. También se observaron sequías extremas en Luya, con un índice de -1,195 en marzo de 2004. La evolución espacial del Índice de Vegetación Estandarizado (SVI) permitió reconocer sequías moderadas y severas en las provincias cafetaleras de Amazonas, Luya, Rodríguez de Mendoza y Utcubamba, estas condiciones climáticas extremas podrían afectar la producción de café en la zona, para ello, se espera que esta información sirva para futuras estrategias enfocadas en el manejo y prevención de impactos por sequía en zonas productoras de café.

Gutierrez-Cori (2018) analizo la variabilidad espacial y temporal de los índices de sequías extremas en la cuenca andino-amazónica peruana, a partir de datos de sensores remotos en el periodo 2001-2016. Se utilizaron datos del satélite TERRA, tanto de temperatura superficial del suelo (LST) como índices

de vegetación (NDVI), productos MOD11 y MOD13. Además, se usaron datos del satélite TRMM, que tiene información diaria de precipitación a través de los productos 3B42 y 3B42-RT. Además, se usaron datos de precipitación observada e interpolada del observatorio HYBAM (HOP). Se generaron tres índices de sensoramiento remoto para describir el comportamiento interanual de las sequías en la cuenca: Índice de Condición de Temperatura (TCI), Índice de Condición de Vegetación (VCI) e Índice de Condición de Precipitación (PCI). Con estos índices se categorizaron las intensidades de la sequía en leve, moderada, severa y extrema. A nivel de cuenca, los índices señalan que los años 2005 y 2010 tuvieron sequías extremas que afectaron aproximadamente al 30% y 50% del área de la cuenca, respectivamente. Se analizó la correlación entre la precipitación y la vegetación, y se encontró que la precipitación acumulada explica parcialmente la vegetación andino-amazónica ($r = 0.34$). La frecuencia de días secos (DDF) se correlaciona con los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) con coeficientes de correlación de $r = -0.86$ para los datos HOP, $r = -0.75$ para los datos 3B42 y $r = -0.68$ para los datos 3B42-RT, donde los resultados señalan que altos valores de DDF se relacionan con una disminución de las condiciones de vegetación. Esta asociación se vuelve especialmente importante en la región ubicada al sur de los 6°S , lo que sugiere que la vegetación en la mayor parte de la Amazonía peruana está limitada por el agua. Se generó un índice llamado Frecuencia de Días Secos (DDF), para el seguimiento en tiempo real de sequías extremas y su potencial impacto sobre la vegetación en la cuenca andino-amazónica. Este índice se basa en datos estimados de lluvia en tiempo real, en este caso los datos TRMM 3B42-RT.

2.1.3 Alcance local

SENAMHI (2021) utilizando datos del sistema MIDAS, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) realizó un monitoreo de precipitaciones durante una década para la región de Madre de Dios, utilizando los datos del sistema MIDAS de PISCO, que integra datos climatológicos e hidrológicos interpolados. Se clasificó el grado de sequía utilizando los percentiles (deciles) de la precipitación acumulada cada 10 días:

para precipitación por debajo del decil 10 ($p_{10} \leq$), sequía extrema, de p_{10} a p_{20} , sequía severa, y de p_{20} a p_{30} , sequía moderada. Estos datos identificaron períodos críticos dentro de esa temporada seca, mostrando dónde la precipitación acumulada cayó por debajo del 20% del rango histórico, indicando así condiciones de sequía severa a extrema en porciones significativas de Madre de Dios. Este enfoque produjo mapas de alerta temprana y vulnerabilidad hidrológica, que tienen un impacto directo en la planificación y las decisiones que las autoridades locales y nacionales toman sobre los recursos hídricos y las estrategias de mitigación de sequías. Los datos decanales provienen del sistema SONICS, cuyos datos se actualizan el 1, 11 y 21 de cada mes y pueden tener algunas discrepancias que se corrigen en versiones posteriores, que se actualizan para mejorar la precisión y las capacidades predictivas de la predicción para la Amazonía peruana. Este monitoreo es parte del proyecto Climandes 2, y se actualiza periódicamente para precisión predictiva.

Por otro lado, una amplia gama de fenómenos climáticos impacta las condiciones de sequía que existen en la región. Los episodios de El Niño, que causan un aumento de las temperaturas en la superficie del Océano Pacífico Ecuatorial, alteran los patrones de vientos y precipitaciones 'normalmente asignados' históricamente y disminuyen posteriormente la lluvia en la Amazonía. Esto, a su vez, agrava las condiciones de sequía existentes. Estos episodios de El Niño, el cambio climático y la deforestación en la región han sido la causa del aumento de la frecuencia y la intensidad de períodos de sequía prolongados, interrumpiendo el equilibrio de cierre del río Amazonas y de sus afluentes y el ciclo hidrológico. El calentamiento global se complementa con el fenómeno de agua cálida predominante en el Océano Atlántico y el Atl, incluso los patrones de cambio climático están exacerbando esta sequía. Estos fenómenos han conducido a impactos socioambientales significativos que incluyen la pérdida de biodiversidad, daños a los cultivos y el impacto de todo esto en las poblaciones locales conservadoras. En conjunto, estos fenómenos del cambio climático señalan la necesidad de

contar con un sistema robusto de protección socioambiental y de fenómenos climáticos en la región amazónica del Perú.

2.2 Base teórica

2.2.1 Bosque

Sistema ecológico complejo y recurso natural en el que los árboles son la forma de vida dominante. Los bosques se definen tanto por la presencia de árboles como por la ausencia de otros usos predominantes de la tierra. Los árboles deben poder alcanzar una altura mínima de 5 metros in situ. Se incluyen las áreas en reforestación que aún no han alcanzado una densidad de copa del 10 por ciento o una altura de árbol de 5 m, así como las áreas temporalmente despobladas, como resultado de la intervención humana o de causas naturales, que se espera que se regeneren (Whitmore y Burnham 1975; FAO 2012).

2.2.2 Bosque Amazónico tropical

La selva amazónica es el bosque tropical más grande de la Tierra y tiene la mayor densidad de especies de plantas y animales del mundo. Esta impresionante región brinda servicios ecológicos esenciales, estabiliza los patrones de lluvia del mundo y almacena enormes cantidades de carbono que mitigan el cambio climático (Whitmore y Burnham 1975; Asner et al. 2009; FAO 2012).

2.2.3 Estrés hídrico

Hablamos de estrés hídrico cuando la demanda de agua es superior a la cantidad disponible durante un determinado periodo de tiempo, o cuando su uso está restringido debido a su baja calidad (FAO 2020).

2.2.4 Sequia

La sequía es un período seco prolongado del ciclo climático natural que puede ocurrir en cualquier parte del mundo. Es un desastre de evolución lenta que se caracteriza por la falta de precipitaciones, lo que da lugar a una escasez de agua. La sequía puede tener graves consecuencias para la salud, la agricultura, las economías, la energía y el medio ambiente.

La sequía pone en riesgo los medios de vida y los ecosistemas y, en casos extremos, puede provocar hambrunas, desplazamientos y conflictos. El 60% de todas las muertes causadas por fenómenos meteorológicos extremos se deben a sequías, aunque estas representan solo el 15% de los desastres naturales. Entre 1998 y 2017, las sequías causaron pérdidas económicas por valor de 124.000 millones de dólares a nivel mundial. Sin embargo, a pesar de que 70 países del mundo se ven afectados periódicamente por sequías, en 2013 sólo tres países contaban con planes de acción integrales.

2.2.5 Principios básicos de teledetección

Los principios de la teledetección implican la detección y medición de las radiaciones de diferentes longitudes de onda que se reflejan o emiten desde la superficie de objetos o materiales distantes, lo que ayuda a su identificación y categorización. Tiene cuatro componentes básicos a medir, que incluyen: Fuente de energía, Ruta de transmisión, Objetivo y Sensor de satélite.

Entre estos componentes, una fuente de energía, también conocida como energía electromagnética, desempeña un papel muy importante, ya que cumple un papel importante para transmitir la información desde el objetivo hasta el sensor. También se puede describir como un espectro electromagnético en el que existen muchas formas de energía que pueden describirse como diferentes tipos de energía en una región específica del espectro.

Este espectro incluye la luz visible, las ondas de radio, las microondas, las ondas de calor, los rayos infrarrojos, los rayos ultravioletas, los rayos X y los rayos gamma. También es una sinopsis del continuo de ondas

electromagnéticas y energía, desde longitudes de onda extremadamente cortas, como los rayos gamma cósmicos, hasta longitudes de onda extremadamente largas, como las de la televisión y las ondas de radio. Siempre debe tenerse en cuenta que estas divisiones no son absolutas ni definidas, ya que pueden producirse superposiciones.

En función de la longitud de onda y de la insignificante ubicación espectral, las principales aplicaciones se pueden aproximar con bandas de satélite adecuadas para la clasificación (Anji-Reddy 2010).

2.2.5.1 Onda electromagnética

Es la energía en forma de luz solar que se mueve a través del espacio, tal fenómeno se mueve a la velocidad de la luz, lo que percibimos como luz es simplemente un pequeño segmento de esto. La teledetección funciona midiendo estas ondas, cada onda se caracteriza por dos componentes fundamentales en forma de longitud de onda, la distancia entre picos de medición de ciclos sucesivos que define el color o tipo de energía, y frecuencia, la tasa de oscilación. El tipo de interacción que tiene la energía con la selva amazónica (reflexión, absorción o emisión) depende directamente de la longitud de onda que se esté observando (Jensen 2009).

2.2.5.2 Espectro electromagnético

Un espectro electromagnético denota la distribución continua de la radiación electromagnética organizada por longitud de onda o frecuencia. Los sensores de satélite no miden toda la porción del espectro, funcionan predominantemente en áreas denominadas ventanas atmosféricas, donde la atmósfera de la tierra es lo suficientemente translúcida como para permitir que la radiación llegue a la superficie terrestre y se refleje o emita de nuevo al sensor. Los más importantes en su monitoreo de sequías incluyen: el visible (que proporciona el color verde), el infrarrojo cercano (NIR), el infrarrojo de onda corta (SWIR) y el infrarrojo térmico (LST). Estas regiones son críticas

para el análisis de vegetación sana, estresada o suelo desnudo (Jensen 2009).

2.2.5.3 Bandas espectrales

Las bandas del espectro se refieren a los rangos específicos de longitudes de onda que el sensor MODIS registra y cada una de las bandas es seleccionada en función de cómo interactúa de manera única con la clorofila y el contenido de agua de la vegetación, la humedad del suelo y la temperatura. Un resumen o análisis de las interacciones ofrece una visión sobre la condición de salud del ecosistema. La interacción de la energía con la vegetación se realiza de una manera característica que indica el estrés hídrico de la vegetación:

- ✓ La primera es la Banda Roja: la banda que va de 0,620 a 0,670 μm . La banda roja se encuentra dentro del rango de luz visible. La vegetación saludable durante el proceso de fotosíntesis absorbe energía en esta banda debido a la clorofila. La ruptura por deshidratación de los arbustos y la pérdida severa de vegetación, significa menos absorción de humedad e incluso más absorción de luz que reflexión; la fotosíntesis, entonces, se reduce.
- ✓ Cercano Infrarrojo (NIR): Esta es la banda de 0,841 a 0,876 μm , y la estructura celular interna saludable de una hoja refleja altamente la energía en esta banda, y así es como la estructura celular interna refleja energía en esta banda. Un valor considerable en NIR indica biomasa densa y saludable. La disminución del valor NIR es un indicador preliminar de estrés o daño celular por deshidratación, incluso antes de que los cambios de color sean visibles para el ojo humano.
- ✓ Infrarrojo de Onda Corta (SWIR): Las bandas SWIR utilizadas en este trabajo (Banda 6: 1,628 a 1,652 μm y Banda 7: 2,105 a 2,155 μm) responden al contenido de agua, donde la reflectancia SWIR es inversamente responsiva al contenido de agua de la vegetación y el suelo, ya que el agua es el principal absorbente en estas longitudes de onda, lo que implica, un aumento de la reflectancia SWIR (utilizada en

NMDI y NDDI) indica una disminución del contenido de agua en la planta o el suelo.

Infrarrojo Térmico (LST): Esta banda (aproximadamente de 10,78 a 11,28 μm) mide la energía que se emite como calor desde la superficie de la Tierra, es aquí que a través del proceso de evapotranspiración de la vegetación saludable, hay enfriamiento activo, lo que implica que durante períodos de sequía, la humedad se ve afectada y la humedad en la planta se mantiene a través de un proceso llamado cierre de estomas, que detiene el enfriamiento evaporativo y resulta en un gran aumento de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST). Este aumento en LST es un componente crucial del VHI para monitorear y evaluar el estrés hídrico en el ecosistema circundante (Jensen 2009).

2.2.6 Teoría de índices de sequía y salud vegetal

Los índices de sequía a partir de la teledetección utilizan las propiedades de reflectancia y emisión del suelo capturadas por sensores satelitales para estimar el estrés hídrico de la vegetación y el suelo. Se derivan del hecho de que el bienestar de la vegetación con respecto a la humedad y su relación con la Radiación Electromagnética altera la interacción (Caccamo et al. 2011; Zhu et al. 2024). En la actualidad algunos países han medido la sequía de manera más local a través del Índice de Sequía, el cual es un indicador que describe la intensidad de sequía en un área determinada a partir de la diferencia del índice de Vegetación e Índice Diferencial de Agua. El indicador mide la superficie afectada por la sequía con el propósito de analizar el comportamiento y tendencia de la sequía a largo plazo, para que los tomadores de decisiones ejecuten proyectos orientados a disminuir el indicador, aumentando los recursos hídricos en el suelo, para satisfacer las necesidades presentes y futuras de los seres vivos.

2.2.6.1 Índice de salud vegetativa (VHI)

El VHI es un índice compuesto de sequía diseñado para evaluar la condición de la vegetación. Es un índice híbrido que integra dos componentes vitales.

El índice de condición de la vegetación (VCI) evalúa el nivel de vegetación y su productividad en el presente en comparación con los registros históricos. el índice de condición de la temperatura (TCI) mide el nivel de estrés al que se somete una planta como resultado de la alta temperatura. Durante la sequía, una planta disminuye su transpiración (el proceso de pérdida de humedad de su superficie, en forma de vapor, que una planta suda), lo que aumenta su temperatura superficial y, por lo tanto, genera un mayor estrés. El índice está clasificado de manera que los valores bajos indican una condición de estrés hídrico y los valores altos indican condiciones normales o de alta salud: Estas clases son: Sequía Extrema (0-10), Sequía Severa (10-20), Sequía Moderada (20-30), Sequía Ligera (30-40), Estrés / Normal (40-60), Normal a Saludable (60-70), Saludable (70-80), Muy Saludable (80-90), Excelente Salud (90-100) (Du et al. 2018; Aksoy et al. 2019).

2.2.6.2 Índice de sequia de diferencia normalizada (NDDI)

El NDDI está diseñado para mejorar el diagnóstico de sequías mediante la información de verdor y de humedad de la vegetación. Se trata de una combinación de la información de las bandas que miden la actividad fotosintética (NDVI), y las bandas que son sensibles al agua (NDWI), lo que resulta en una estimación más certera del estado hídrico de la planta y el suelo. El índice está clasificado de manera que los valores bajos indican una condición de sequía o estrés hídrico y los valores altos indican condiciones normales o de alta humedad: El rango de valores del NDDI entre -1 y 1. Los valores bajos del NDDI definen condiciones de sequía (Du et al. 2018; Aksoy et al. 2019). Los valores NDDI se clasificaron en ocho categorías: Sequía Extrema (< -0,30), Sequía Severa (-0,30 a -0,20), Sequía Moderada (-0,20 a -0,10), Sequía Ligera (-0,10 a 0,00), Normal / Transición (0,00 a 0,10), Humedad Ligera (0,10 a 0,20), Humedad Moderada (0,20 a 0,30), Alta Humedad (> 0,30) (Gulácsi y Kovács 2015; Du et al. 2018; Aksoy et al. 2019; Zhu et al. 2024).

2.2.6.3 Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI)

El NMDI se enfoca en medir la humedad interna. Utiliza la diferencia de dos bandas en el Infrarrojo de Onda Corta (SWIR), que son altamente sensibles a la absorción de agua. Está diseñado para capturar el contenido de humedad tanto en la vegetación como en las capas superficiales del suelo. El índice está clasificado de manera que los valores bajos indican una condición de sequía o estrés hídrico y los valores altos indican condiciones normales o de alta humedad. Los valores NMDI se clasifican en 4 tipos diferentes como: Sequía Severa ($< -0,20$), Sequía Moderada ($-0,20$ a $-0,10$), Sequía Ligera ($-0,10$ a $0,00$), Normal a Ligeramente Húmedo ($0,00$ a $0,10$), Humedad Moderada ($0,10$ a $0,20$), Alta Humedad ($> 0,20$) (Wang et al. 2008; Aksoy et al. 2019).

2.2.7 Sensor MODIS

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un instrumento clave a bordo de los satélites Terra (originalmente conocido como EOS AM-1) y Aqua (originalmente conocido como EOS PM-1). La órbita de Terra alrededor de la Tierra está sincronizada de modo que pasa de norte a sur a través del ecuador por la mañana, mientras que Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador por la tarde. MODIS de Terra y MODIS de Aqua observan toda la superficie de la Tierra cada 1 o 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales o grupos de longitudes de onda (consulte las Especificaciones técnicas de MODIS). Estos datos mejorarán nuestra comprensión de la dinámica global y los procesos que ocurren en la tierra, en los océanos y en la atmósfera inferior. MODIS está desempeñando un papel vital en el desarrollo de modelos validados, globales e interactivos del sistema terrestre capaces de predecir el cambio global con la precisión suficiente para ayudar a los responsables de las políticas a tomar decisiones acertadas en relación con la protección de nuestro medio ambiente (Rahimzadeh Bajgiran et al. 2009; Du et al. 2013; Shamloo et al. 2022).

El instrumento MODIS proporciona una alta sensibilidad radiométrica (12 bits) en 36 bandas espectrales cuya longitud de onda oscila entre $0,4 \mu\text{m}$ y $14,4$

µm. Las respuestas se adaptan a las necesidades individuales de la comunidad de usuarios y proporcionan una respuesta fuera de banda excepcionalmente baja. Se obtienen imágenes de dos bandas con una resolución nominal de 250 m en el nadir, cinco bandas a 500 m y las 29 bandas restantes a 1 km. Un patrón de escaneo de ± 55 grados en la órbita EOS de 705 km logra una franja de 2330 km y proporciona cobertura global cada uno o dos días (Rahimzadeh Bajgiran et al. 2009; Du et al. 2013; Shamloo et al. 2022).

El instrumento MODIS ha sido diseñado y desarrollado desde que se completó el Modelo de Ingeniería (EM) a mediados de 1995. Desde entonces, se han completado y lanzado dos unidades de vuelo espacial, el Modelo Protoflight (PFM) (a bordo del Satélite Terra) y el Modelo de Vuelo 1 (FM1) (a bordo del Satélite Aqua). Terra se lanzó el 18 de diciembre de 1999 y Aqua se lanzó el 4 de mayo de 2002. Los instrumentos MODIS, construidos según las especificaciones de la NASA por Santa Barbara Remote Sensing, representan lo mejor en ingeniería de hardware de vuelo espacial para detección remota (Rahimzadeh Bajgiran et al. 2009; Du et al. 2013; Shamloo et al. 2022).

2.3 Definición de términos

Índice de sequía: un índice de sequía combina múltiples indicadores de sequía (por ejemplo, precipitación, temperatura, humedad del suelo) para describir las condiciones de sequía (Aksoy et al. 2019).

MODIS: el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) es un instrumento científico puesto en órbita terrestre por la NASA en 1999 a bordo del satélite Terra (EOS AM) y en 2002 a bordo del satélite Aqua (Du et al. 2013).

Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI): el método utilizado para obtener el NDDI fue restar el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) por el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) y luego dividir por el NDVI más el NDWI (Du et al. 2018).

El índice de salud de la vegetación (VHI): ilustra la gravedad de la sequía en función de la salud de la vegetación y la influencia de la temperatura en las condiciones de las plantas. Esta capa se actualiza cada 10 días (Du et al. 2018).

Índice de Sequía Normalizado Multibanda (NMDI): se enfoca en medir la humedad interna. Utiliza la diferencia de dos bandas en el Infrarrojo de Onda Corta (SWIR), que son altamente sensibles a la absorción de agua. Está diseñado para capturar el contenido de humedad tanto en la vegetación como en las capas superficiales del suelo (Du et al. 2018).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo de estudio

El presente estudio es de tipo descriptivo y correlacional. Es Descriptivo porque fue monitoreado, caracterizado y cuantificado el avance de sequía y el área afectada en la provincia de Tambopata de 2004 a 2024, con el uso de índices espectrales. Es Correlacional por cuanto en su parte más fundamental buscó el desempeño comparativo entre los índices (NDDI, VHI y NMDI), para ello, se evaluó la precisión de la clasificación con respecto a la referencia (Landsat) a través del coeficiente Kappa (León y González 2020; Lozano et al. 2025).

3.2 Diseño del estudio

El estudio corresponde a un diseño no experimental longitudinal, porque monitoreó las condiciones de sequía mediante índices espectrales del satélite MODIS en un ecosistema de la provincia de Tambopata, Amazonia de Madre de Dios durante un período de veinte años (2004-2024) (León y González 2020; Lozano et al. 2025).

3.3 Delimitación espacial y temporal

El territorio de la provincia de Tambopata pertenece a la región Amazónica de Madre de Dios, con una extensión de cerca de 3 622 021,136 ha. La provincia se sitúa geográficamente entre los 11°15'28" S y 13°1'51" S, y entre los 70°36'2" O y 72°32'26" O. La altitud de los distritos fluctúa entre los 200 y 250 m s.n.m. (GOREMAD y IIAP 2009; SENAMHI 2015; Alarcón et al. 2016; Alarcon-Aguirre et al. 2021).

Tambopata tiene un clima tropical: cálido, húmedo y con lluvias anuales que superan los 1000mm. En Puerto Maldonado, la capital del departamento, la temperatura promedio anual es de 26°C, los niveles más altos alcanzan los 38°C. en agosto y setiembre; las temperaturas más bajas llegan a 8°C. Hay una etapa de precipitaciones muy limitadas que se extiende durante los meses de junio a agosto. Las precipitaciones se extienden desde diciembre hasta marzo. En ocasiones, el clima se ve afectado por corrientes de aire frío provenientes del sureste del continente americano, provocando notables disminuciones de la temperatura, que reducen el termómetro hasta 8oC. y que a nivel local son denominados "surazo" o "friaje" (Holdridge 1967).

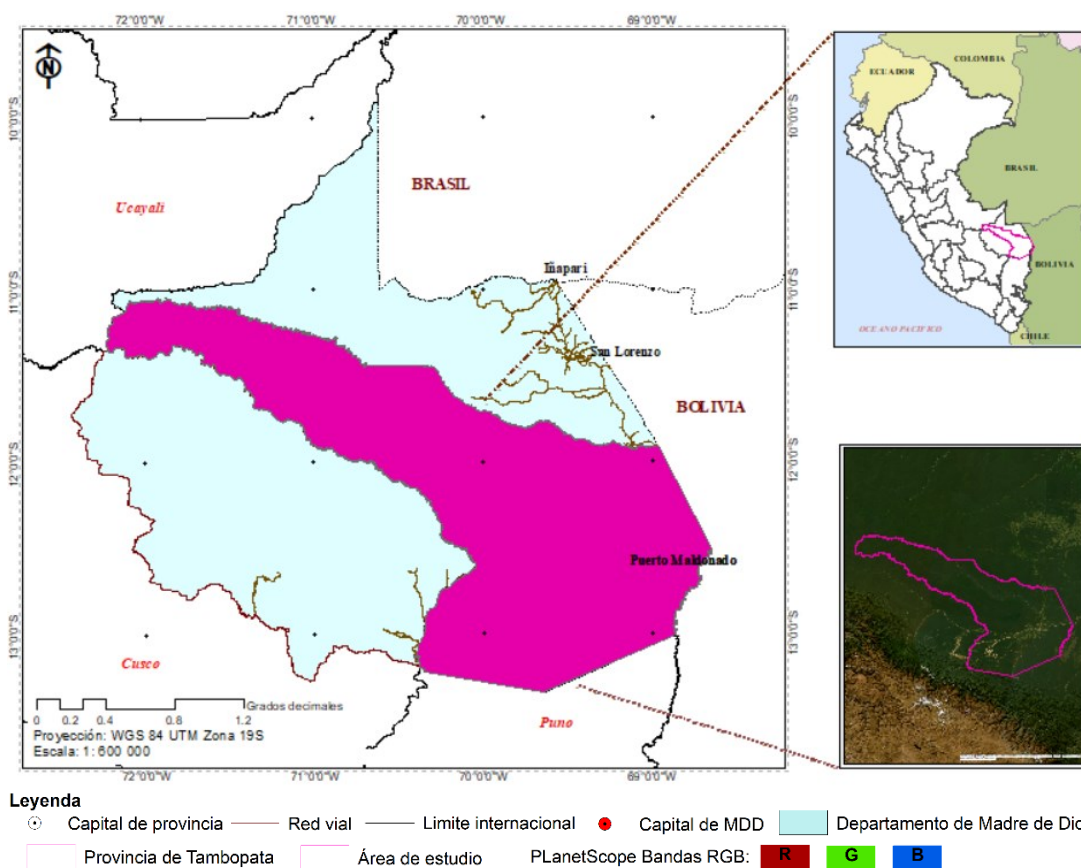


Figura 1. Localización de área de estudio.

El área de estudio está caracterizada por una extensa llanura aluvial, compuesta por sedimentos recientes y antiguos que han sido arrastrados por los ríos principales (Las Piedras y Tahuamanu), y presenta una topografía

plana a leve inclinación (0 a 5%). Se compone de dos clases de tierra distintas: una antigua planicie aluvial y una moderna del Cuaternario (GOREMAD y IIAP 2009).

Las industrias más relevantes incluyen la madera, la castaña, la agricultura y la ganadería (GOREMAD y IIAP 2009).

El estudio se evaluó en la serie de tiempo de 2004 a 2024.

3.4 Población y muestra

La población equivale a una extensión de 3 622 021,136 hectáreas, sin embargo, como unidad de medida se considerará la totalidad de píxeles de las imágenes MODIS en el área de estudio. La cantidad de muestras para examinar y confirmar las condiciones de sequía mediante el uso de índices espectrales del satélite MODIS en un ecosistema de la provincia de Tambopata, Amazonía de Madre de Dios durante un lapso de veinte años (2004-2024). La unidad de la muestra corresponde al punto de muestreo que en este caso es un píxel y está ubicado por una coordenada en unidades métricas que se utilizara en la validación de las clasificaciones con las imágenes de referencia (Landsat), para el cálculo se utilizó una distribución binomial de probabilidades (Ochoa y Páez 2019). Debido a la gran extensión y la gran cantidad de análisis (píxeles), para fines estadísticos se aplicó la fórmula para poblaciones infinitas (Ecuación 1):

$$n = \frac{Z^2 pq}{E^2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

dónde:

Z: Es el valor de la curva normal estandarizada para un nivel determinado de probabilidad, 1,96 (95%).

p: indica el porcentaje de aciertos estimado, 0,50 (50%).

q: Indica el porcentaje de errores ($q = 1 - p$), 0,50 (50%).

E: El error permitido, 0,05 (5%).

$$n = \frac{(1,96)^2 * 0,5 * 0,5}{0,05^2}$$

$n = 384,12 = 384$ puntos de muestreo (píxeles)

Sin embargo, para efecto de mayor distribución proporcional en el área de estudio se utilizó 500 puntos de muestreo, para lograr este objetivo se aplicó un muestreo no probabilístico por conveniencia, donde la selección de los puntos se realizó bajo el juicio del investigador para lograr la distribución equiprobable de las clases. (Ochoa y Páez 2019).

La distribución para cada índice correspondió (Tabla 2 y Figura 3-5):

Tabla 2. *Distribución de muestras por índice*

NDDI	Sequía extrema	Sequía severa	Sequía moderada	Sequía ligera	Normal /Transición	Humedad ligera	Humedad moderada	Alta humedad	
Muestras	62	62	62	62	62	62	62	66	
NMDI	Sequía Severa	Sequía moderada	Sequía ligera	Normal a ligeramente húmedo	Humedad moderada	Alta humedad	Sequía Severa		
Muestras							500		
VHI	Sequía extrema	Sequía severa	Sequía Moderada	Sequía ligera	Estrés / Normal	Normal a saludable	Saludable	Muy saludable	Excelente salud
Muestras	56	56	56	56	56	55	55	55	55

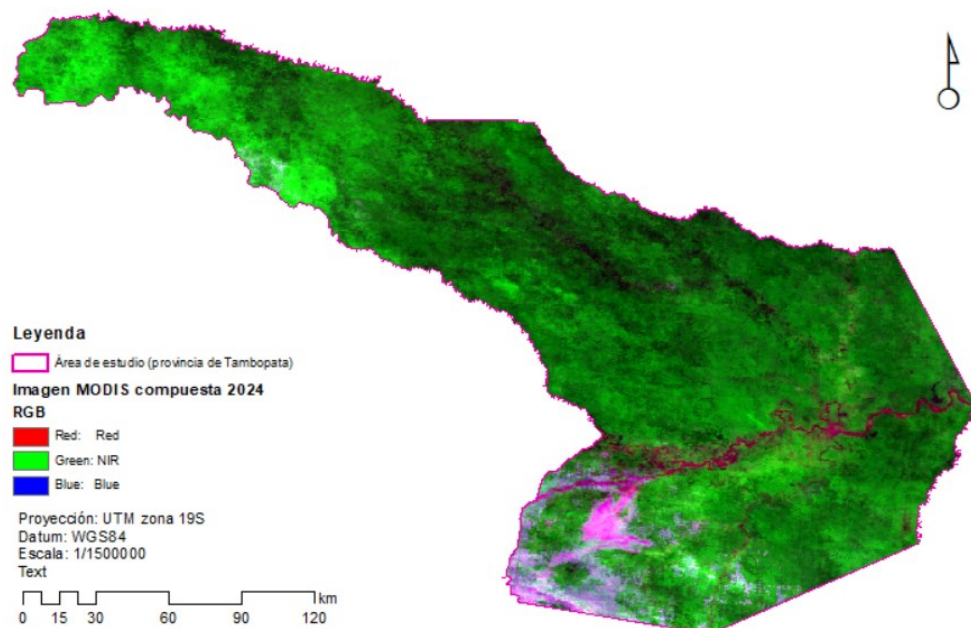


Figura 2. Imágenes de satélite MODIS (MOD09A1).

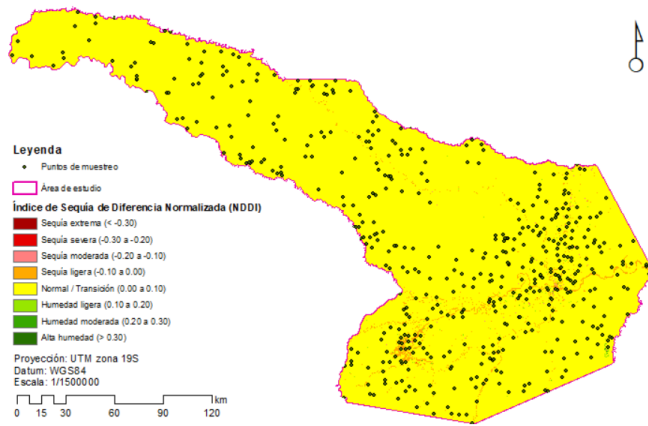


Figura 3. Puntos de muestreo del Índice de Sequía de Diferencia Normalizada (NDDI).

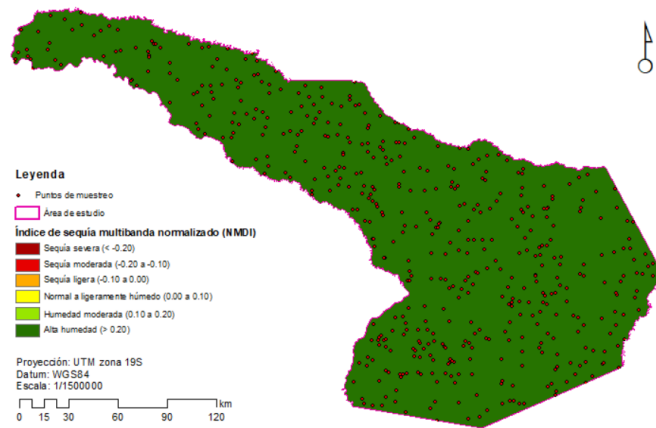


Figura 4. Puntos de muestreo del Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI).

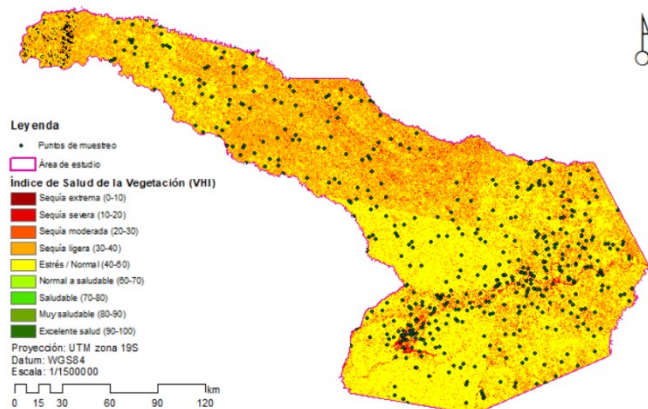


Figura 5. Puntos de muestreo del Índice de Salud de la Vegetación (VHI)

3.5 Método y técnicas

El estudio utilizó el enfoque de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) para monitorear y evaluar las sequías en la provincia de Tambopata (2004-2024) dentro de un proceso para la adquisición, preprocesamiento, aplicación de índices y validación (Jensen 1996). El estudio se basó en uno de los productos satelitales MODIS, conocido como MOD09A1 (reflectancia de superficie global de 8 días L3), con una resolución de 500 m, para el período 2004-2024. MOD09A1 es una de las entradas del satélite MODIS que se utiliza para producir otros datos terrestres MODIS. Datos como MOD11A2 LST, MOD12 y MOD13. El producto MOD11 proporciona una temperatura y emisividad de la superficie terrestre (LST&E); MOD12 es un producto de cobertura terrestre/cambio de cobertura terrestre; MOD13 es una cuadrícula de datos de vegetación. Los datos se obtendrán en intervalos de 8 días y contenían siete bandas espectrales (Gu et al. 2007; Caccamo et al. 2011; Sun et al. 2013; Mohd-Razali et al. 2016; Zormand et al. 2017; Shamloo et al. 2022). La banda espectral del MODIS es adecuada para obtener una señal de vegetación, así como índices de estrés hídrico y de humedad, empleando información de bandas de reflectancia del infrarrojo cercano, rojo, verde e infrarrojo de onda corta (Shamloo et al. 2022). El producto satelital es adecuado para estudiar la situación de sequía en los bosques tropicales porque el satélite MODIS fue construido con características especiales en sus instrumentos y sus componentes espaciales, para la sensibilidad térmica y la estructura de aislamiento mecánico (Kogan 1995b). Los datos para este estudio se recopilarán del sitio web de la NASA (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>), la plataforma de archivo de datos más conveniente disponible para navegar, verificar la calidad de los datos y organizarlos.

Las imágenes se tomaron en días de mínima nubosidad, porque la nubosidad contamina la información en las imágenes ópticas y pueden interferir con la interpretación, reduciendo así la precisión (Gulácsi y Kovács 2015; Aksoy et al. 2019; Shamloo et al. 2022). Los procedimientos de detección de nubes se llevaran a cabo mediante mejora de imágenes utilizando el método de

combinación de bandas: (i) 1, 4, 3 (colores verdaderos); (ii) 7, 2, 1 y (iii) 2, 6, 1 para identificar nubes aisladas (Gulácsi y Kovács 2015; Aksoy et al. 2019; Shamloo et al. 2022). Se utilizó un valor de reflectancia de $> 0,2$ para eliminar los píxeles contaminados de todas las imágenes (Gu et al. 2007; Shahabfar y Eitzinger 2011; Gulácsi y Kovács 2015; Aksoy et al. 2019; Shamloo et al. 2022). Se tomaron cortes de densidad y se siguió un procedimiento de enmascaramiento, utilizando la plataforma en la nube de GEE, así como los softwares ENVI 5,6®, ArcGIS Pro 3,3® y ArcGIS 10,8®, que fueron proporcionado por el CETEGERN-UNAMAD (Alarcón et al. 2016) y CINCIA para eliminar las nubes. Las imágenes MODIS con alta visibilidad suelen ser particularmente difíciles de obtener en áreas de bosque tropical debido a las condiciones de gran cobertura de nubes. Para aumentar la precisión durante el muestreo, descargaremos imágenes para los años en cuestión y fueron analizadas con coincidencia de bandas para obtener imágenes de alta calidad (Kogan 1995b; Gu et al. 2007; Caccamo et al. 2011; Shahabfar y Eitzinger 2011; Gulácsi y Kovács 2015; Aksoy et al. 2019; Shamloo et al. 2022).

Para la estimación de zonas afectadas por sequía en los bosques Amazónicos de la provincia de Tambopata, se aplicó la metodología basada en la obtención del Índice de Sequia de Diferencia Normalizada (NDDI, Normalized Difference Drought Index), Índice de Salud de la Vegetación (VHI, Vegetation Health Index) e Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI, Normalized Multiband Drought Index) en la que se emplearon herramientas basadas en la Teledetección (Gu et al. 2007; Sun et al. 2013; Mohd-Razali et al. 2016; Zormand et al. 2017; Aksoy et al. 2019; Angearu et al. 2020; Shamloo et al. 2022), tecnología que permitió adquirir datos de la superficie terrestre desde sensores remotos, en tal caso nos proporcionó imágenes de satélite de diferentes fechas, para estudiar la sequía y evolución a lo largo del tiempo por medio de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En cuanto a la determinación de VHI se tuvo inconvenientes. No se puede determinar el VHI para el periodo anterior de 2013 utilizando datos MODIS debido principalmente a problemas de continuidad y calibración entre las diferentes misiones. Asimismo, hay limitación en la disponibilidad de Bandas

Termales (Thermal Infrared) necesarias para calcular los índices básicos (como NDVI y LST) a partir de los cuales se obtiene el VHI. Por estas razones, VHI se calculó para el periodo de 2013-2024.

Para la medición de la precisión de los índices de sequía se utilizó imágenes Landsat 5 TM, 7 ETM+, 8 OLI y 9 OLI 2 (Aksoy et al. 2019), la medición comprendió un muestreo estratificado aleatorio (Zhang et al. 2020). Para tal caso, se aplicó una matriz de confusión que midió la precisión general y la concordancia de kappa (k) (Cohen 1960; Elijah y Jensen 1996; Cohen et al. 2003; Alarcón et al. 2016). Los valores estimados de kappa para cada índice, permitirá validar o rechazar la hipótesis planteada en el trabajo de investigación.

3.6 Tratamiento de datos

3.6.1 Procesamiento de datos

El estudio comprendió las siguientes fases:

- 1. Selección de imágenes de satélite:** como imagen de teledetección para los análisis se utilizó el sistema MODIS (Tabla 3). El sensor MODIS se lanzó en 1999 con el satélite Terra, que fue puesto en órbita por la NASA. Su resolución espacial es de 250 m para 2 bandas, 500 m para 5 bandas y 1 km para las 29 bandas restantes. En este estudio se utilizaron imágenes satelitales Terra MODIS de 8 días compuestas MOD11A2 LST de 1 km de resolución espacial, imágenes de reflectancia de superficie de 8 días compuestas MOD09A1 de 500 m de resolución espacial e imágenes de índice de vegetación de 16 días compuestas MOD13A2 de 1 km de resolución espacial.

Tabla 3. Datos MODIS utilizados en el estudio.

Sensor	Marco temporal de imágenes	Estación
MOD09A1, MOD11A2 LST y MOD13A2	2004 a 2024	Junio a septiembre de cada año

- 2. Corrección y enmascaramiento de imágenes:** las imágenes se tomaron en días de mínima nubosidad, porque la nubosidad contamina la información en las imágenes ópticas y pueden interferir con la interpretación, reduciendo así la precisión (Gulácsi y Kovács 2015; Aksoy et al. 2019; Shamloo et al. 2022). Los procedimientos de detección de nubes se llevaron a cabo mediante mejora de imágenes utilizando el método de combinación de bandas: (i) 1, 4, 3 (colores verdaderos); (ii) 7, 2, 1 y (iii) 2, 6, 1 para identificar nubes aisladas (Gulácsi y Kovács 2015; Aksoy et al. 2019; Shamloo et al. 2022). Se utilizará un valor de reflectancia de $> 0,2$ para eliminar los píxeles contaminados de todas las imágenes (Gu et al. 2007; Shahabfar y Eitzinger 2011; Gulácsi y Kovács 2015; Aksoy et al. 2019; Shamloo et al. 2022). Se tomaron cortes de densidad y se siguió un procedimiento de enmascaramiento, utilizando la plataforma en la nube de GEE, así como los softwares ENVI 5,6®, ArcGIS Pro 3,3® y ArcGIS 10,8®.
- 3. Índices espectrales:** para la determinación de las áreas afectadas por la sequía, se aplicó la metodología basada en la obtención del Índices:
- 3.1. Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI):** el NDDI se deriva de Gu et al. (2007) utilizando los valores del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI). NDVI producido mensualmente a partir de imágenes compuestas MODIS MOD13A2 de 16 días y MODIS MOD09A1 de 8 días utilizando bandas rojas (645 nm) e infrarroja cercana (857 nm).

$$NDVI = \frac{(p857-p645)}{(p857+p645)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

p857 define la banda del infrarrojo cercano y p645 define las bandas rojas en (1). Los valores del NDVI están entre -1 y +1. Cuando los valores del NDVI se acercan a +1 significa que la vegetación es saludable, la disminución del NDVI indica una disminución de la vegetación. Los valores negativos representan cuerpos de agua y ambiente húmedo. El valor 0,1 del NDVI significa tierra desnuda. Para analizar la sequía, los valores del NDVI se limitan al rango entre 0,1 y 1 (Gu et al. 2007; Du et al. 2013).

El NDWI se calculó a partir de la diferencia normalizada entre las bandas espectrales del infrarrojo cercano (857 nm) y del infrarrojo de onda corta (1230 nm) (Gu et al. 2007; Du et al. 2013). Du et al. (2013) afirma que el NDWI también se puede calcular a partir de la diferencia normalizada entre las bandas espectrales del infrarrojo cercano (857 nm) y del infrarrojo de onda corta (2130 nm). Para el análisis de sequías, se seleccionó la fórmula que se utilizó para calcular el NDWI según lo definido por Du et al. (2013).

$$NDWI = \frac{(p857-p2130)}{(p857+p2130)} \quad (\text{Ecuación 3})$$

p857 representa el infrarrojo cercano y p2130 representa las bandas espectrales infrarrojas de onda corta (Ecuación 3). El NDWI se produce mensualmente utilizando imágenes compuestas MODIS MOD13A2 de 16 días y MODIS MOD09A1 de 8 días. La condición de sequía para el NDWI es inferior a 0,3. Los valores de NDWI superiores a 0,4 representan áreas sin sequía (Du et al. 2018).

La ecuación NDDI (Ecuación 4) se presenta a continuación con respecto al NDVI y NDWI calculados a partir de datos MODIS:

$$NDDI = \frac{(NDVI-NDWI)}{(NDVI+NDWI)} \quad (\text{Ecuación 4})$$

El rango de valores del NDDI entre -1 y 1. Los valores bajos del NDDI definen condiciones de sequía (Du et al. 2018; Aksoy et al. 2019). Los valores NDDI se clasificaron en ocho categorías: Sequía Extrema (< -0,30), Sequía Severa (-0,30 a -0,20), Sequía Moderada (-0,20 a -0,10), Sequía Ligera (-0,10 a 0,00), Normal / Transición (0,00 a 0,10), Humedad Ligera (0,10 a 0,20), Humedad Moderada (0,20 a 0,30), Alta Humedad (> 0,30) (Gulácsi y Kovács 2015; Du et al. 2018; Aksoy et al. 2019; Zhu et al. 2024).

- 3.2. Índice de Salud de la Vegetación (VHI):** el VHI se basó en la media ponderada de dos índices, VCI y TCI. Kogan (1995a) desarrolló el VHI para mejorar la detección de sequías. El VCI es un índice derivado de los valores del NDVI para separar el componente meteorológico del componente del ecosistema. La derivación del Índice de condición de la vegetación (VCI) desarrollado por Kogan (1995b) es separar el componente meteorológico del componente del ecosistema (Du et al. 2018).

$$VCI = \frac{(NDVI_i - NDVI_{min})}{(NDVI_i + NDVI_{min})} \quad (\text{Ecuación 5})$$

NDVI_i define el valor de NDVI al que pertenece el mes observado, NDVI_{min} y NDVI_{max} definen los valores mínimo y máximo de los valores NDVI en el periodo de estudio (Ecuación 5) (Du et al. 2018; Aksoy et al. 2019). El rango de VCI oscila entre 0 y 1. El TCI se crea a partir del hecho de que la temperatura de la superficie es más alta en años secos y se deriva del cambio de la temperatura de la superficie en una serie temporal específica. Los valores bajos de TCI significan signos de sequía. Los valores de TCI brindan información adicional sobre el estrés de la vegetación y determinan si el estrés es el resultado de la sequedad y la humedad adicional (Kogan 1995a). El TCI se calcula a partir de la siguiente ecuación.

$$TCI = \frac{(LST_{max} - LST_i)}{(LST_{max} + LST_i)} \quad (\text{Ecuación 6})$$

LST_i define el valor LST que pertenece al mes observado, LST_{\min} y LST_{\max} definen valores mínimos y máximos de los valores TCI en el período de estudio (Du et al. 2018; Aksoy et al. 2019). Los valores TCI brindan información adicional sobre el estrés de la vegetación y determinan si el estrés es el resultado de la sequedad y la humedad adicional (Kogan 1995a).

El VHI supone que el índice de condición de la vegetación y el índice de condición de la temperatura son inversamente proporcionales, pero no siempre es así. Esta relación varía con las estaciones, la vegetación y las características climáticas. Por lo tanto, se debe examinar esta relación.

$$VHI = \alpha * VCI + (1 - \alpha) * TCI \quad (\text{Ecuación 7})$$

Dado que las condiciones ambientales no se conocen con precisión, el valor de α seleccionado será de 0,5, lo que da el mismo peso a VCI y VHI. VHI se utilizó para clasificar las condiciones de sequía en nueve clases. Estas clases son: Sequía Extrema (0-10), Sequía Severa (10-20), Sequía Moderada (20-30), Sequía Ligera (30-40), Estrés / Normal (40-60), Normal a Saludable (60-70), Saludable (70-80), Muy Saludable (80-90), Excelente Salud (90-100) (Du et al. 2018; Aksoy et al. 2019).

Se crearon mapas de condiciones de sequía utilizando los valores de VHI de junio a setiembre para cada año del período de estudio.

En cuanto a la determinación de VHI se tuvo inconvenientes. No se puede determinar el VHI para el periodo anterior de 2013 utilizando datos MODIS debido principalmente a problemas de continuidad y calibración entre las diferentes misiones. Asimismo, hay limitación en la disponibilidad de Bandas Termal (Thermal Infrared) necesarias para calcular los índices básicos (como NDVI y LST) a partir de los cuales se obtiene el

VHI. Por estas razones, VHI se calculó para el periodo de 2013-2024.

- 3.3. Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI):** NMDI es un índice de sequía mejorado basado en las firmas espectrales del suelo y la vegetación mediante el uso de una longitud de onda NIR de casi 860 nm y dos longitudes de onda SWIR de 1640 nm y 2130 nm.

$$NMDI = \frac{(R_{860nm} - (R_{1640nm} - R_{2130nm}))}{(R_{860nm} + (R_{1640nm} - R_{2130nm}))} \quad (\text{Ecuación 8})$$

R_{860nm} , R_{1640nm} y R_{2130nm} son la reflectancia del estado que se observan desde sensores satelitales a 860 nm, 1640 nm y 2130 nm de reflexión (Wang y Qu 2007). Según [13], los píxeles de agua o los píxeles sin nubes se mapean como plantas en el estado cuyos valores NDVI son mayores que y es igual a 0,4. Los valores bajos de $NMDI_{veg}$, que se definen para interpretar las condiciones de humedad de las plantas de los píxeles definidos como plantas, definen una sequía creciente de la vegetación. El rango de NDDI está entre -1 y 1.

Los valores NMDI se clasifican en 4 tipos diferentes como: Sequía Severa (< -0,20), Sequía Moderada (-0,20 a -0,10), Sequía Ligera (-0,10 a 0,00), Normal a Ligeramente Húmedo (0,00 a 0,10), Humedad Moderada (0,10 a 0,20), Alta Humedad (> 0,20) (Wang et al. 2008; Aksoy et al. 2019).

- 4. Comparación de índices:** para comparar y analizar los índices, se consideró el periodo de sequía entre junio a septiembre, porque la sequía se puede observar fácilmente entre esas fechas. Así como como el criterio de disponibilidad de imágenes en mejores condiciones. El análisis correspondió a un periodo de 20 años (2004-2024), a excepción de VHI (2013-2024).

3.6.2 Estadística aplicada y precisión de datos clasificados

Para la medición de la precisión se utilizó imágenes Landsat 5 TM, 7 ETM+, 8 OLI y 9 OLI 2 de 30 m de resolución espacial (Aksoy et al. 2019), la medición comprendo un muestreo estratificado aleatorio (Zhang et al. 2020). Para tal caso, se aplicó una matriz de confusión que medio la precisión general y la concordancia de kappa (k) (Cohen 1960; Elijah y Jensen 1996; Cohen et al. 2003; Alarcón et al. 2016).

$$\text{Precision general} = (VP + VN)/(VP + FP + VN + FN) \quad (\text{Ecuación 9})$$

donde: VP es verdadero positivo, VN verdadero negativo, FP falso positivo, y FN falso negativo.

$$\text{Kappa}(k) = f_o - f_c/N - f_c \quad (\text{Ecuación 10})$$

donde: f_o : proporción de unidades concordantes, y f_c : proporción de unidades para las que se espera una concordancia al azar.

Tabla 4. Valores del coeficiente kappa

Coeficiente Kappa	Fuerza de la Concordancia
“0,00”	“Pobre (<i>Poor</i>)”
“0,01 – 0,20”	“Leve (<i>Slight</i>)”
“0,21 – 0,40”	“Aceptable (<i>Fair</i>)”
“0,41 – 0,60”	“Moderada (<i>Moderate</i>)”
“0,61 – 0,80”	“Considerable (<i>Substantial</i>)”
“0,81 – 1,00”	“Casi perfecta (<i>Almost perfect</i>)”

Fuente: Cerda y Villarroel (2008); Cohen (1960); (Cohen et al. 2003); Landis y Koch (1977).

Se utilizaron 500 puntos de muestreo por cada índice, según se especifican en la Tabla 2. Los valores estimados de kappa para cada índice, permitirá validar o rechazar la hipótesis planteada en el trabajo de investigación.

3.6.3 Análisis estadístico

En base a los objetivos del estudio, se realizaron análisis estadísticos.

Para el primer y segundo objetivo, sobre determinar y comparar la serie temporal del Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI), Índice de Salud de la Vegetación (VHI) e Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI) en un ecosistema de la provincia de Tambopata durante un periodo de veinte años (2004-2024), se analizó las condiciones y severidad de sequía mediante la plataforma en la nube de Google Earth Engine (GEE), así como los softwares ENVI 5,6®, ArcGIS Pro 3,3® y ArcGIS 10,8®, los cuales fueron validadas mediante una matriz de confusión que midió la precisión general y la concordancia de kappa (k) (Cohen 1960; Elijah y Jensen 1996; Cohen et al. 2003; Alarcón et al. 2016).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Serie temporal del Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI), Índice de Salud de la Vegetación (VHI) e Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI)

Las Figuras 6-8 muestran una serie de mapas del NDDI para los periodos 2004-2024 de la provincia de Tambopata. La mayoría de los mapas para la época seca (junio-septiembre) estiman una predominancia de colores amarillos a anaranjados claros. Indicando que la condición más común son Sequía Extrema, Sequía Ligera, Normal/Transición y Alta Humedad. Este resultado es esperable en la Amazonia en la estación seca, donde un alto grado de estrés hídrico es normal. Asimismo, se pueden apreciar pequeñas variaciones de tonalidad que indican zonas con condiciones más secas (hacia el anaranjado oscuro/rojo) que corresponden a áreas mineras, agricultura y ganadería o también un poco más húmedas (hacia el amarillo claro/verde).

Por otro lado, la Figura 9 muestra la evolución anual del valor promedio del NDDI de 2004 hasta 2024. El NDDI promedio para el periodo seco oscila entre los rangos de Humedad Ligera (0,10 a 0,20) y Normal/Transición (0,00 a 0,10). Esto comprueba lo que se observa en los mapas: donde la Sequía Severa y Extrema no es la condición media anual en la época seca para toda la provincia. En el 2005, NDDI se acerca al límite de Sequía Ligera (0,00). Esto corresponde un evento de sequía significativa. En el 2010, hay otra caída pronunciada, acercándose al rango de Sequía Ligera. En los años 2015 y 2016 los valores son relativamente bajos, ubicándose en el rango Normal/Transición o Sequía Ligera. Asimismo, el año 2015-2016 se produce el evento El Niño fuerte, que se asocia con sequías en la Amazonía, por lo que hay consistencia en la caída del NDDI por este fenómeno. También se puede observar que en 2020 y 2021 los valores son relativamente bajos.

Los años 2004, 2007, 2011, 2014, 2017 y 2023 se caracterizan como los de mayor humedad, con subidas NDDI, donde en ciertos casos, se sitúa en el rango de Humedad Ligera y Humedad Moderada (0,20 a 0,30). Lo que representa condiciones humedad fuera de los normal en la estación seca.

La serie temporal evidencia una variabilidad interanual en las condiciones hídricas durante la época seca. Se muestra años con mayor estrés hídrico y otros con condiciones más húmedas, propio de la dinámica climática de la región. A nivel de promedio, se ve la ausencia de Sequía Extrema/Severa. Sin embargo, es importante destacar que el valor promedio del NDDI para toda la provincia no entra en los rangos de Sequía Moderada, Severa y Extrema. A pesar de ello, si bien podría haber focos de sequía más intensos a nivel local, los valores promedios de la provincia en la época seca se mantienen en condiciones normales, ligeramente húmedas y ligeramente secas. Estos datos podrían variar al cuantificar las superficies por categoría de NDDI.

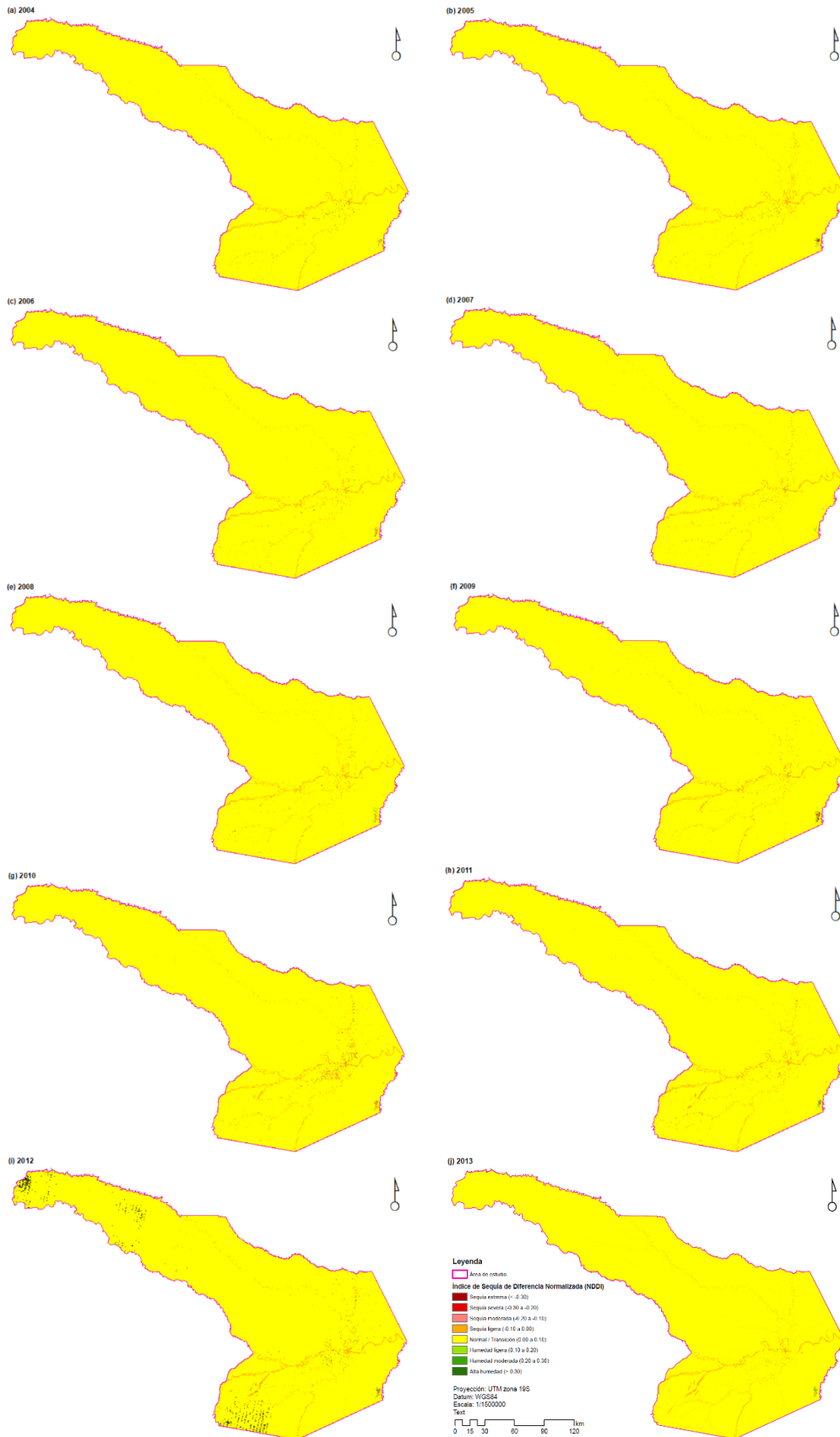


Figura 6. Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI) de 2004-2013 (06-09), Tambopata.

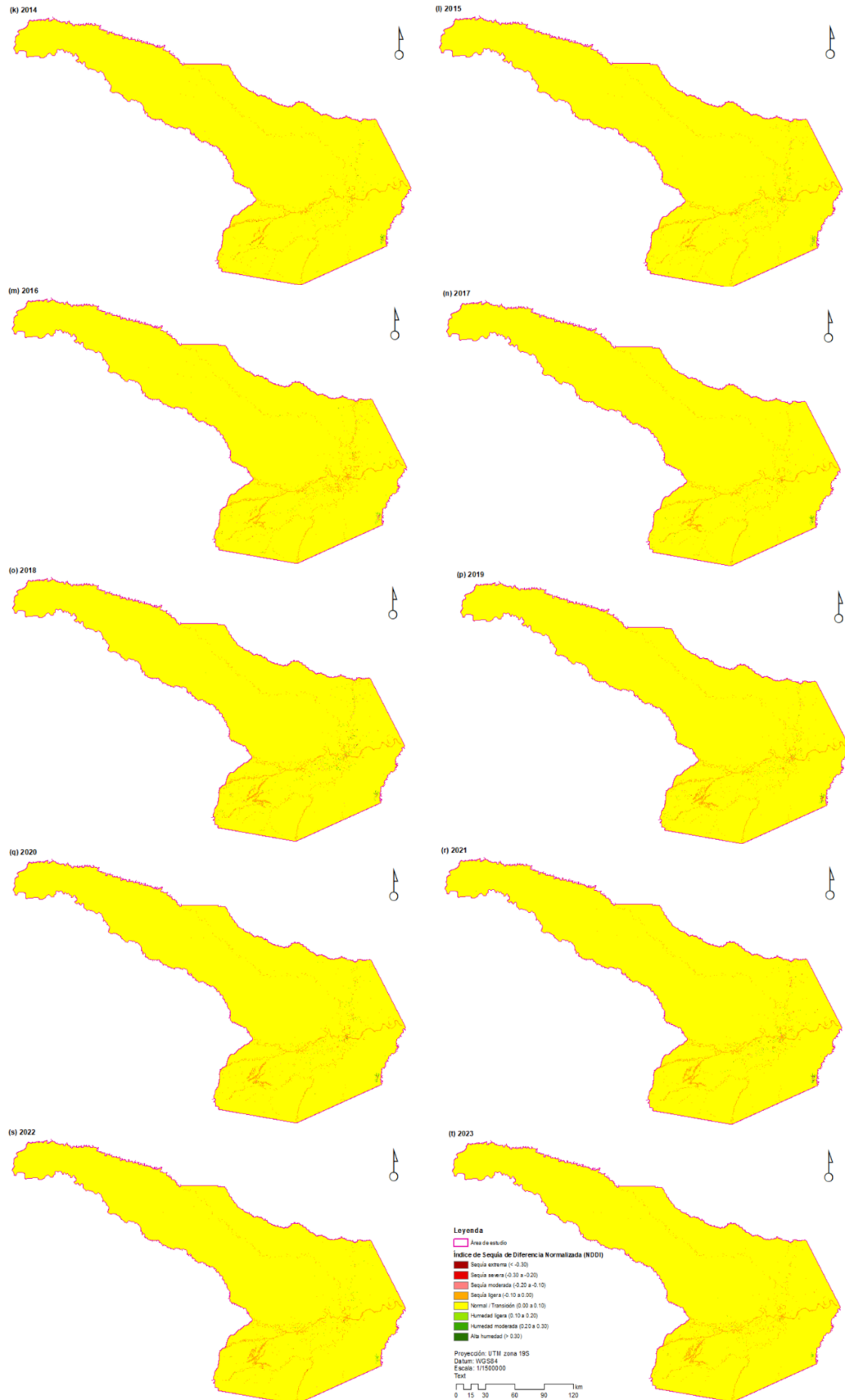


Figura 7. Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI) de 2014-2023 (06-09), Tambopata.

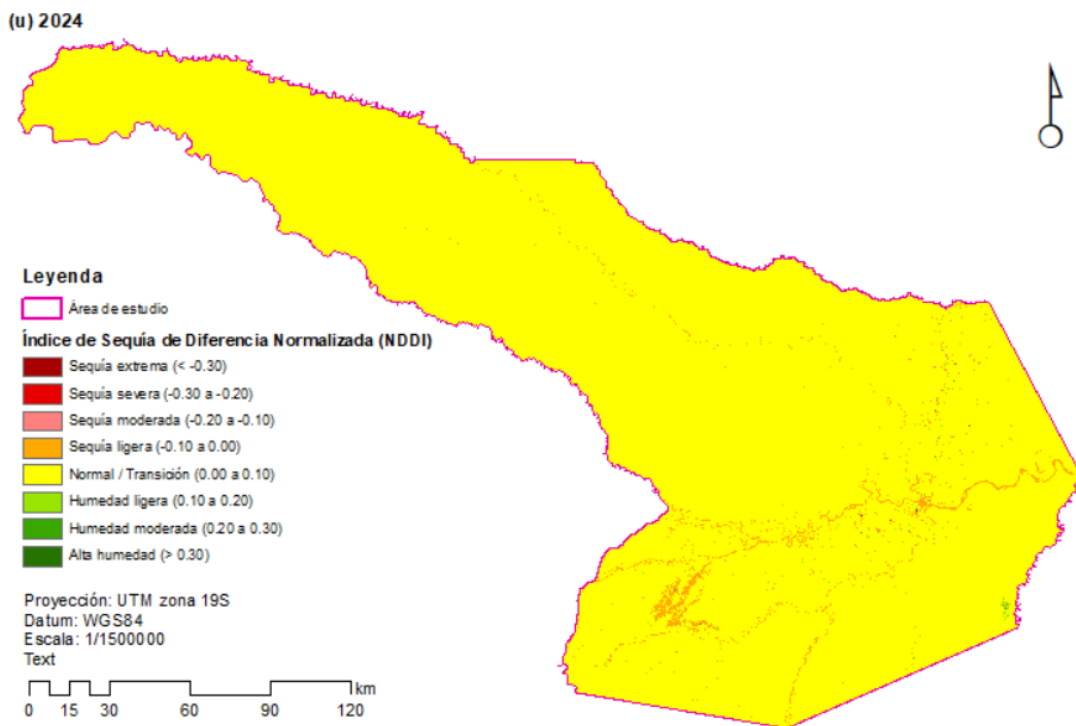


Figura 8. Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI) de 2024 (06-09), Tambopata.

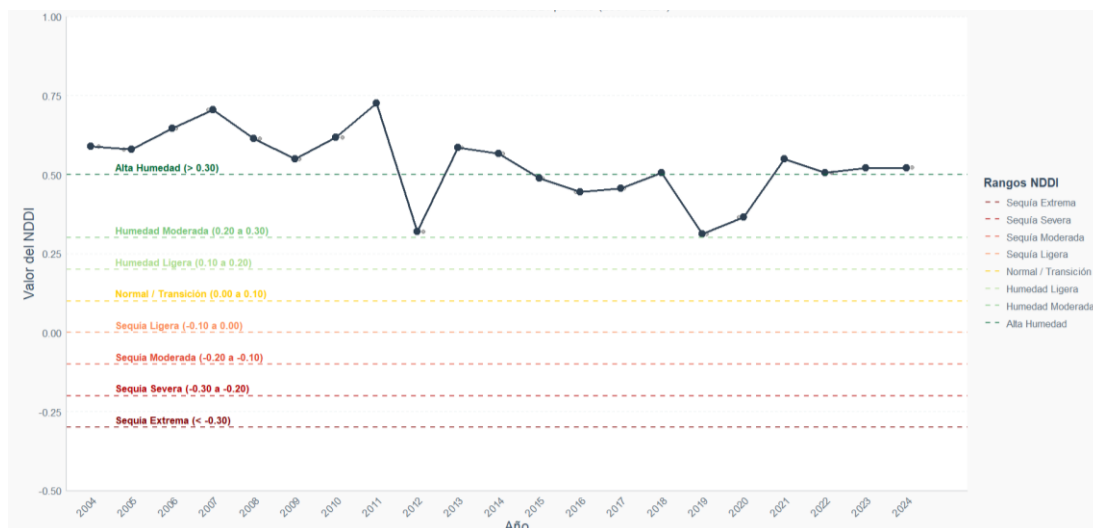


Figura 9. Serie temporal del Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI) de 2004-2024 (06-09), Tambopata.

El monitoreo de sequías mediante índices espectrales mediante satélites (NDDI), demuestran la eficacia de la teledetección satelital con datos MODIS para el monitoreo de sequías en la Amazonia de Madre de Dios (Tambopata).

La capacidad para generar series temporales continuas, en este caso a escala provincial y que supera las limitaciones de los datos tradicionales que están enfocadas en áreas específicas y recónditos de ciertas regiones como la cuenca Amazónica. Esto coincide con lo propuesto por Alahacoon y Edirisinghe (2022), quienes, en su estudio revisaron 111 índices de sequía, y resaltan los avances en la teledetección en el diseño de nuevos índices que facilitan la estimación de extensas áreas y con mejor resolución espacial. En este marco, la teledetección facilita una cobertura y frecuencia de observación impresionantes e importantes en el estudio de la dinámica hidrológica a gran escala.

La detección de eventos de estrés hídrico es coherente con fenómenos climáticos conocidos. En los años 2005, 2010, 2015-2016 y 2020-2021, se observan caídas notables en el índice indicando periodos de mayor estrés hídrico. La sequía de 2015-2016 es más notorio, porque coincide con el evento El Niño reportado por Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI 2021; Martínez-Castro 2024) por causa de una severa reducción de precipitaciones en el sur de la Amazonia peruana. Esto garantiza la robustez del NDDI (Mohd-Razali et al. 2016; Aksoy et al. 2019).

Alahacoon y Edirisinghe (2022) indican que la mayoría de los índices de teledetección (90%) se utilizan para el monitoreo de sequías agrícolas y ecológicas, que están directamente relacionadas con la salud de la vegetación y el agua en el suelo. Bajo este criterio, NDDI, proporciona información de vegetación y humedad, siendo fundamental en escenarios como la Amazonia peruana (Shamloo et al. 2022; Tran et al. 2023; Zhu et al. 2024).

Aunque el NDDI demostró ser efectivo para identificar años secos, los mapas provinciales mostraron mayormente condiciones de Sequía Ligera y Normal/Transición. Evidenciando que la sequía Severa y Extrema no fue estimada a nivel de valores promedios, o también se puede deducir que los valores promedios suavizan focos de sequía más intensa, como sucede en Tambopata, en ese sentido, la aplicabilidad de los índices de sequía puede variar según el tipo de ecosistema y la escala temporal (Wei et al. 2021; Mikaili y Rahimzadegan 2022)

Respecto a NMDI (Figura 10), esta muestra un común denominador en Tambopata para el periodo 2004-2024. Se observa un color dominante; verde oscuro que corresponde a la categoría de Alta humedad ($> 0,20$).

Por otro lado, la Figura 11 muestra la evolución anual del valor promedio del NMDI. Los valores se categorizan en Alta humedad ($> 0,20$). Asimismo, se ve poca variabilidad interanual, la línea del NMDI es plana y estable a lo largo de los 20 años. A pesar de ello, se visualiza pequeñas fluctuaciones, donde la Alta humedad es casi constante.

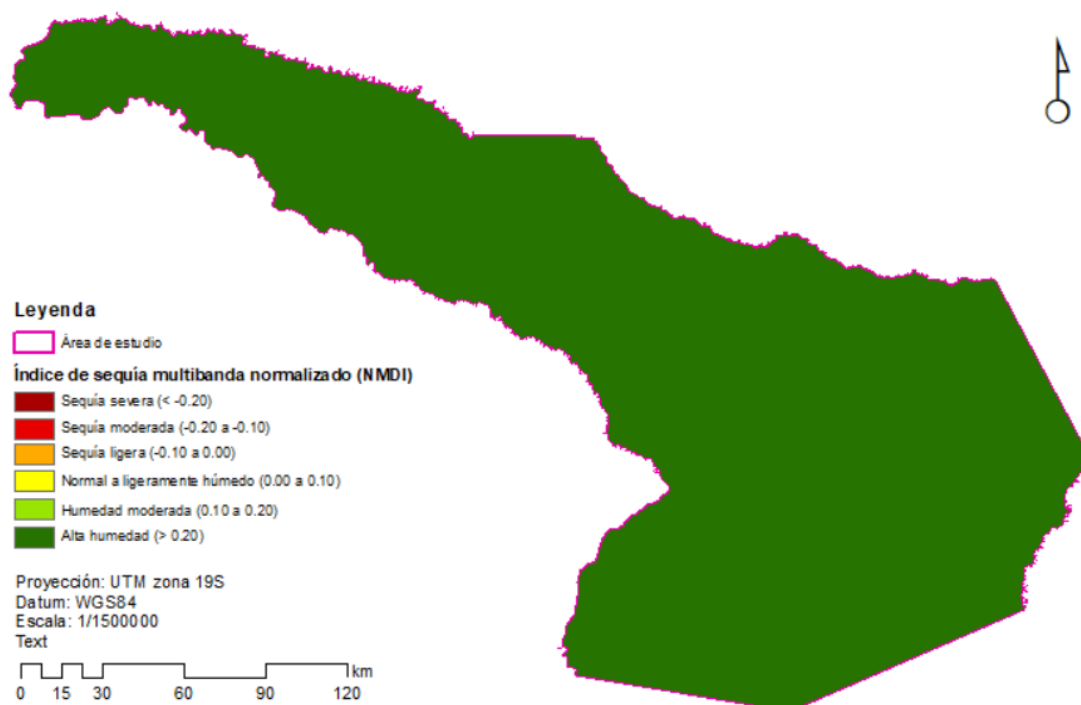


Figura 10. Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI) de 2004-2024 (06-09), Tambopata.

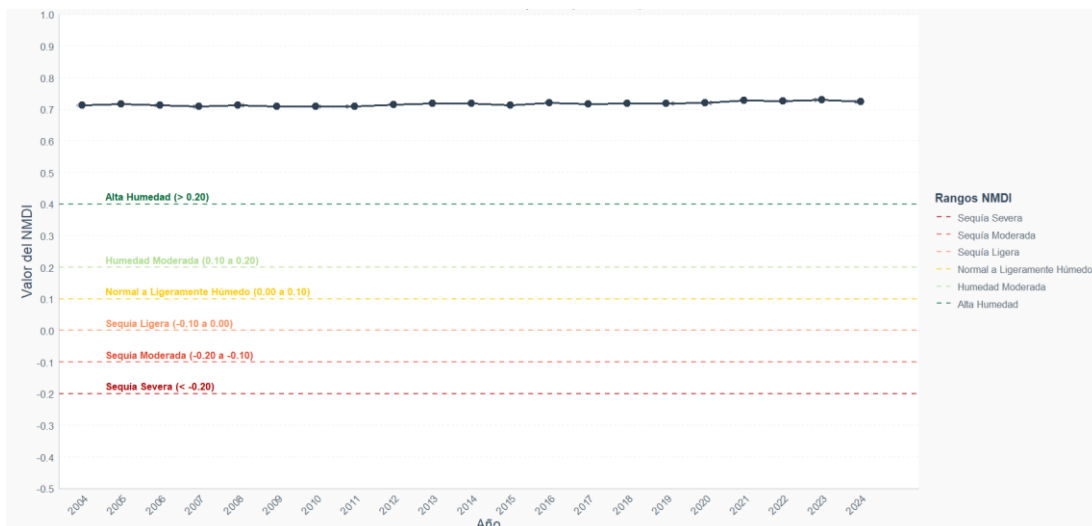


Figura 11. Serie temporal del Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI) de 2004-2024 (06-09), Tambopata.

Los resultados del NMDI en Tambopata muestra una limitada aplicabilidad para el monitoreo de sequía. NMDI, inesperadamente mostró una débil sensibilidad a los eventos de estrés hídrico (Alahacoon y Edirisinghe 2022), La serie temporal del NMDI (Figura 11) se mantuvo casi constante en niveles de Alta Humedad, no reflejando caídas en el índice en años de sequía conocidos, como el fenómeno El Niño 2015-2016 (Gutiérrez-Cori 2018; SENAMHI 2021; Villanueva-Baca 2022; Martínez-Castro 2024). Esta limitación para la detección de anomalías hídricas, podría deberse a que el NMDI, en los umbrales considerados, está generando una saturación en zonas con alta biomasa como el bosque Amazónico, o que sus umbrales no están calibrados para la sensibilidad regional.

Aunque su aplicación puede ser extensa (Aksoy et al. 2019), la homogeneidad del NMDI (Figura 11) lo diferencia de otros índices más dinámicos. Esto contrasta con estudios que muestran la correlación de otros índices con la sequía (Zormand et al. 2017; Wei et al. 2021; Mikaili y Rahimzadegan 2022). Finalmente, de acuerdo a los hallazgos encontrados, no se considera al NMDI una herramienta fiable debido a su bajo desempeño para la alerta temprana de sequías en Tambopata (Mohd-Razali et al. 2016).

Las Figuras 12-14 muestran la distribución espacial del VHI de 2013 a 2022. Los mapas, en su mayoría están conformados por colores naranja y amarillo claro. Lo que corresponde a las categorías de Estrés/Normal (40-60) y Sequía Ligera (30-40), manteniendo un patrón consistente con la serie temporal, donde se muestra al VHI promedio. A pesar que el naranja/amarillo es mayoritario, se pueden observar algunas zonas estrés ligeramente mayor; algunas áreas ubicadas en la parte más occidental y sur de la provincia, o a lo largo de los ríos principales, que muestran tonalidades más rojizas/anaranjadas oscuras, lo que indica focos más intensos de Sequía Moderada (20-30). Estas zonas corresponden a áreas deforestadas por minería de oro, agricultura y ganadería, así como suelo más susceptibles al estrés hídrico. También se puede apreciar zonas de mejor salud, pequeños parches verdes, que indican Normal a Saludable. Estas zonas están conformadas por áreas menos afectadas, o con vegetación más resistente, o con influencias hidrológicas locales, como los cuerpos agua y vegetación circundante.

La evolución anual del valor promedio del VHI para la provincia de Tambopata de 2013 hasta 2024 (junio a septiembre) (Figura 15). Se puede visualizar valores dominados en Estrés/Normal y Sequía Ligera, fluctuando entre 35 y 45. Esto estima las condiciones promedio de la vegetación en Tambopata durante la época seca en la categoría de Sequía Ligera (30-40) así como en el límite inferior de Estrés/Normal (40-60). Este hallazgo es fundamental, porque indica que el VHI en la estación seca en la Amazonía de Madre de Dios se asocia con un nivel de estrés detectable en la vegetación. Por otro lado, se detecta caídas en años como 2015 y 2016, acercándose o entrando en el rango de Sequía Ligera (alrededor de 38-39 en 2015 y un poco menos en 2016), coincidiendo con el fenómeno El Niño 2015-2016 (Gutierrez-Cori 2018; SENAMHI 2021; Villanueva-Baca 2022; Martínez-Castro 2024) que causó sequía en el sur de la Amazonía peruana. Otra caída detectada fue en 2020 y 2021, donde el VHI se ubicó en Sequía Ligera.

NMDI también muestra picos de mejor salud, como en 2014, 2017, 2019 y 2022, donde los valores son más altos en el rango Estrés/Normal, indicando condiciones de menor estrés en la estación seca.

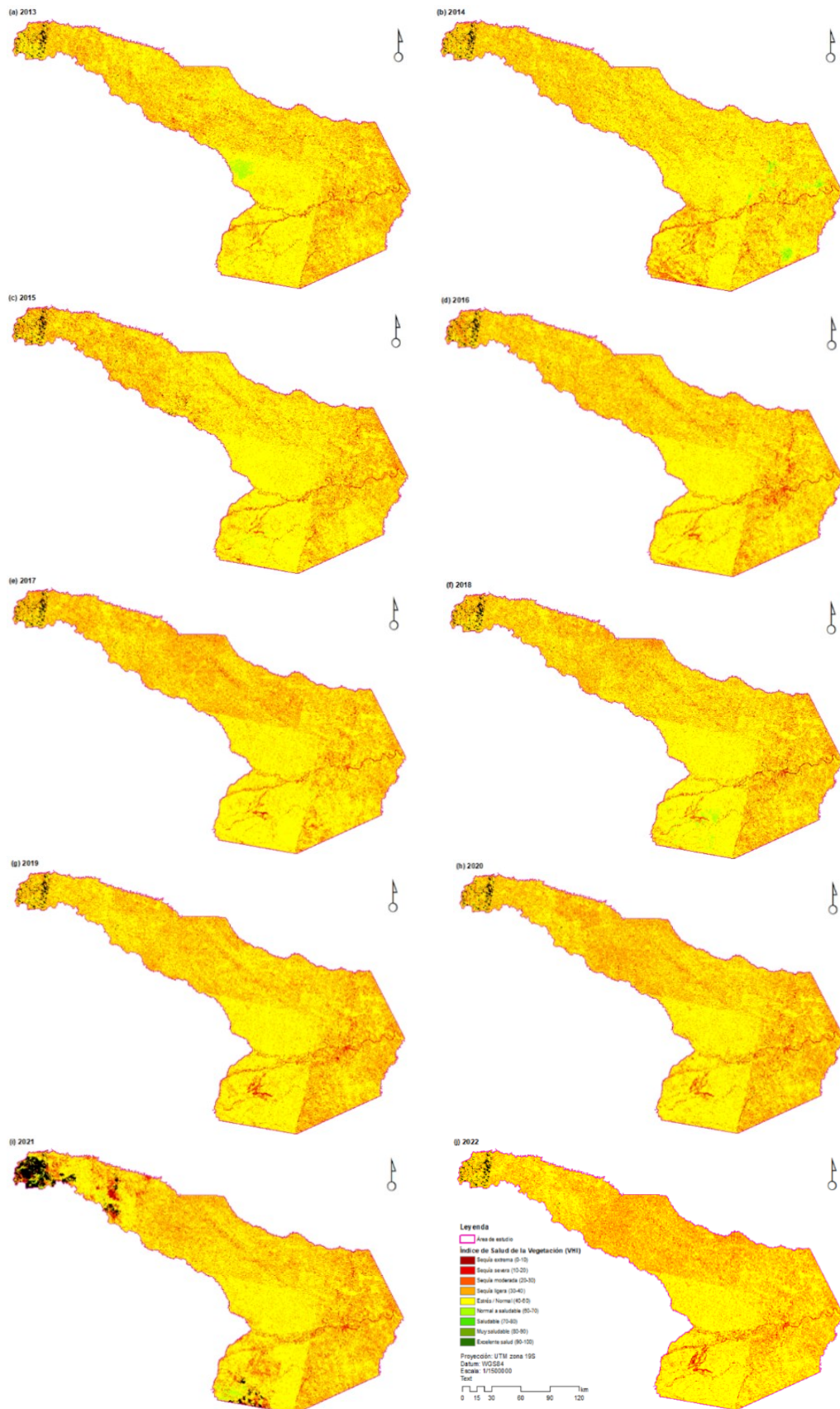


Figura 12. Índice de Salud de la Vegetación (VHI) de 2013-2022 (06-09), Tambopata.

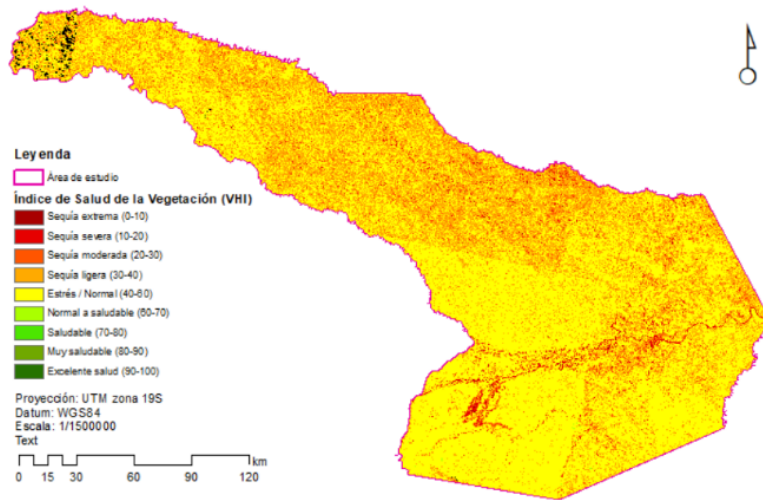


Figura 13. Índice de Salud de la Vegetación (VHI) de 2023 (06-09), Tambopata.

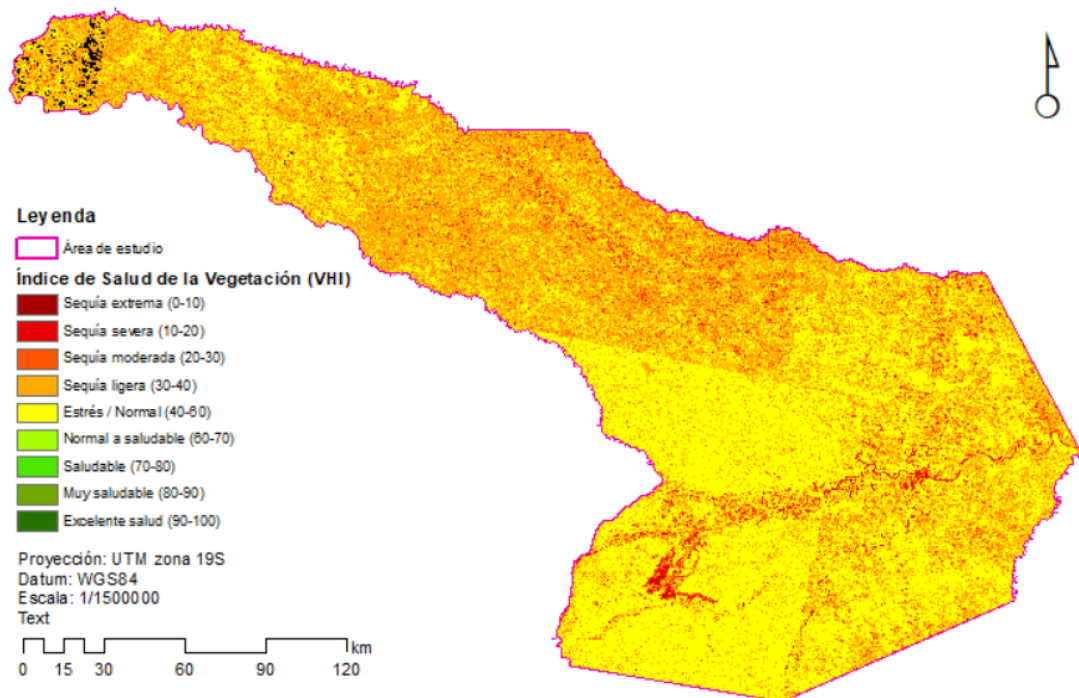


Figura 14. Índice de Salud de la Vegetación (VHI) de 2024 (06-09), Tambopata.

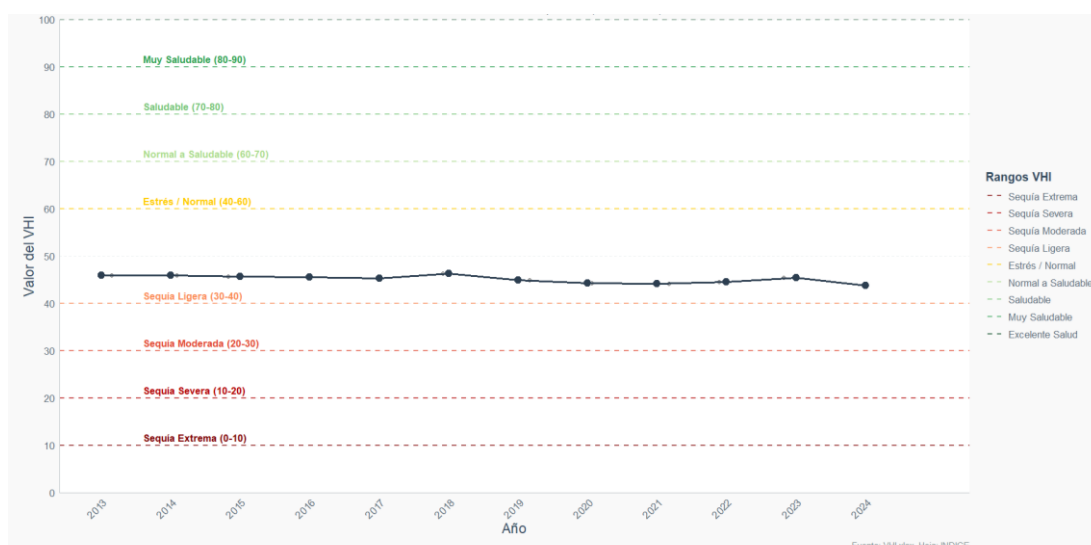


Figura 15. Serie temporal del Índice de Salud de la Vegetación (VHI) de 2013-2024 (06-09), Tambopata.

El VHI ofrece información sobre el estrés hídrico y la salud de los ecosistemas. Los resultados entre 2013 y 2024 confirman su utilidad en el monitoreo de la sequía en la Amazonía sur peruana. VHI presenta una relevancia de la Teledetección y la aproximación híbrida con una capacidad para monitorear extensas áreas, como lo destacan Alahacoon y Edirisinghe (2022), y que son de importancia para la gestión de sequías. El VHI, al ser un índice híbrido que integra dos componentes vitales del estado de la vegetación (verdor y temperatura), se alinea con la tendencia en la investigación de sequías que combina múltiples fuentes de información para una evaluación más robusta mediante el uso de datos MODIS en la plataforma de GEE (Aksoy et al. 2019), lo que permite la construcción de series temporales y análisis espaciales específicos.

Los datos proporcionados por VHI son consistentes con los eventos de estrés hídrico producidos por el fenómeno El Niño (Gutierrez-Cori 2018; SENAMHI 2021; Villanueva-Baca 2022; Martínez-Castro 2024). La serie temporal del VHI (Figura 15), evaluada desde 2013, reporta valores promedio para la época seca en Tambopata que lo sitúan en las categorías de Sequía Ligera (30-40) y en el límite inferior de Estrés/Normal (40-60), mostrando un patrón en la

estación seca y detectando un nivel de estrés en la salud de la vegetación en la Amazonia.

El VHI disminuyó entre 2015 y 2016, categorizado como Sequía Ligera. Esta respuesta coincide con el fenómeno El Niño 2015-2016 (SENAMHI 2021; Martínez-Castro 2024), que fue un período en el que hubo muy pocas lluvias en la parte sur de la Amazonía peruana. La concordancia del VHI con el evento meteorológico demuestra que es eficaz para detectar sequías meteorológicas que perjudican la salud de las plantas.

El uso de datos de la temperatura superficial en el VHI lo hace único para esta detección. El estrés hídrico induce el cierre estomático (mecanismo fisiológico de las plantas para su supervivencia, especialmente en condiciones de déficit de agua), reduciendo la transpiración y alta temperatura de la vegetación. Por su parte Swain et al. (2011) estudiaron cultivos y pastizales como respuesta a la sequía, encontrando un aumento en la temperatura superficial (LST) y poca vigorosidad en la vegetación (NDVI); todo ello, respalda la eficacia del VHI para detectar el estrés. Asimismo, Mikaili y Rahimzadegan (2022) señalaron que índices basados en NDVI tienen alta correlación con SPI en escalas de tiempo largas (6-9 meses), ratificando la eficacia del VHI para un análisis de 20 años en la estación seca.

La cuantificación de NDDI (Tabla 5, Figura 16-17) muestra que la mayor parte de la provincia de Tambopata se encuentra en las categorías de Alta Humedad y Humedad Moderada, con un total de entre 3,5 y 3,6 millones de ha anuales. Sin embargo, hay áreas en condiciones Normales/de transición y de Sequía Leve que tienen entre 500 000 y 1 millón de ha. Hay tres niveles de Sequía; moderada, grave y extrema, que solo afectan a una pequeña parte del área total. Estas cifras cambian al mostrar los años más secos (2016 y 2021).

Tabla 5. Superficie por tipo de categoría de NDDI

Año	Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI, ha)							
	Sequía extrema	Sequía severa	Sequía moderada	Sequía ligera	Normal / Transición	Humedad ligera	Humedad moderada	Alta humedad
2004	37150,61	488,14	487,10	516,72	516,73	512,36	524,67	3581824,80
2005	38736,55	692,46	658,08	642,63	642,13	617,90	635,69	3579395,71
2006	38823,65	451,53	443,46	418,93	407,52	407,37	422,74	3580645,93
2007	36300,51	606,98	559,79	552,28	549,06	550,13	555,24	3582347,15
2008	43159,24	640,85	621,79	581,92	598,75	555,68	549,30	3575313,61
2009	42688,47	519,91	506,57	480,64	482,56	488,79	512,10	3576342,10
2010	52366,39	718,26	702,44	682,98	669,75	635,24	636,16	3565609,91
2011	46797,27	568,95	519,40	499,31	492,70	484,64	461,53	3572197,33
2012	51585,34	669,12	646,06	630,50	599,96	587,13	586,30	3566716,73
2013	46726,12	523,31	492,67	472,88	469,79	458,74	449,22	3572428,41
2014	47534,91	582,48	574,54	563,18	577,22	626,83	653,54	3570908,44
2015	49819,01	551,73	539,41	525,55	525,17	515,01	516,24	3569029,02
2016	63607,27	622,04	608,20	594,27	570,95	573,76	555,78	3554888,87
2017	47471,45	712,87	667,02	645,47	612,66	605,10	590,94	3570715,62
2018	60483,11	501,63	492,76	458,12	458,66	450,00	454,18	3558722,68
2019	60700,59	614,23	579,77	577,35	545,71	543,13	540,01	3557920,34
2020	51120,89	813,28	768,44	737,83	696,89	671,81	673,14	3566538,85
2021	57368,68	886,10	864,84	832,07	810,41	819,86	821,11	3559618,06
2022	53308,28	634,24	624,25	605,94	586,43	609,03	597,38	3565055,58
2023	55100,66	732,51	696,83	660,56	657,31	625,53	632,56	3562915,19
2024	51298,03	1140,09	1034,39	944,65	932,76	886,98	848,82	3564935,42

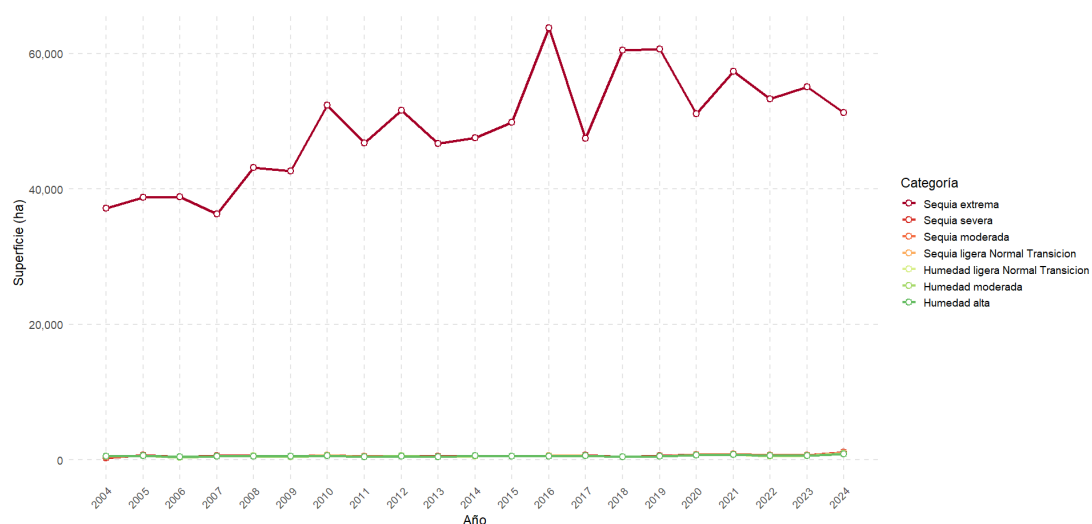


Figura 16. Tendencia de la superficie por categoría de NDDI de 2004-2024, Tambopata.

2020	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3622021,14
2021	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3622021,14
2022	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3622021,14
2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3622021,14
2024	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3622021,14

En cuanto al VHI (Tabla 7, Figura 18), la superficie de Tambopata se divide en los grupos de Estrés/Normal y Sequía Leve. Sin embargo, también hay Sequía Moderada y, en menor medida, Sequía Severa y Extrema, con una mayor incidencia en 2016 y 2021. Las categorías de Normal a saludable y superiores representan áreas muy pequeñas, lo que significa que la vegetación de la provincia está sometida a mucho estrés durante la estación seca.

Tabla 7. Superficie por tipo de categoría de VHI

Año	Índice de Salud de la Vegetación (VHI, ha)								
	Sequía extrema	Sequía severa	Sequía Moderada	Sequía ligera	Estrés / Normal	Normal a saludable	Saludable	Muy saludable	Excelente salud
2013	7528,22	52450,35	195480,04	955033,10	2374299,05	23194,84	12,06	0,00	14023,47
2014	6113,44	49152,80	195173,06	897848,12	2433976,32	20972,89	4631,50	104,17	14048,83
2015	8262,35	59530,76	205778,78	871614,61	2454642,65	3816,12	0,00	0,00	18375,87
2016	5395,94	49898,16	189320,14	1038018,35	2325394,29	18,87	0,09	0,00	13975,29
2017	2591,33	42409,71	202721,13	1142993,22	2215942,84	1391,12	0,00	0,00	13971,78
2018	11588,93	43820,78	192420,71	1050494,42	2293269,95	16454,04	0,52	0,00	13971,78
2019	3178,19	51580,74	206161,57	1113561,89	2233566,78	0,17	0,00	0,00	13971,78
2020	5407,83	52146,68	225295,34	1231658,36	2093529,19	11,97	0,01	0,00	13971,77
2021	9629,06	86210,75	265669,87	1086954,72	2050773,37	9040,00	517,59	2,72	113223,06
2022	3539,37	54854,64	199108,49	1204959,95	2145584,47	2,87	0,26	0,09	13970,99
2023	3897,95	53344,57	199197,16	1066262,51	2284643,82	561,76	0,09	0,00	14113,27
2024	7884,07	59283,38	253650,92	1376173,10	1910168,37	805,34	67,40	8,39	13980,18

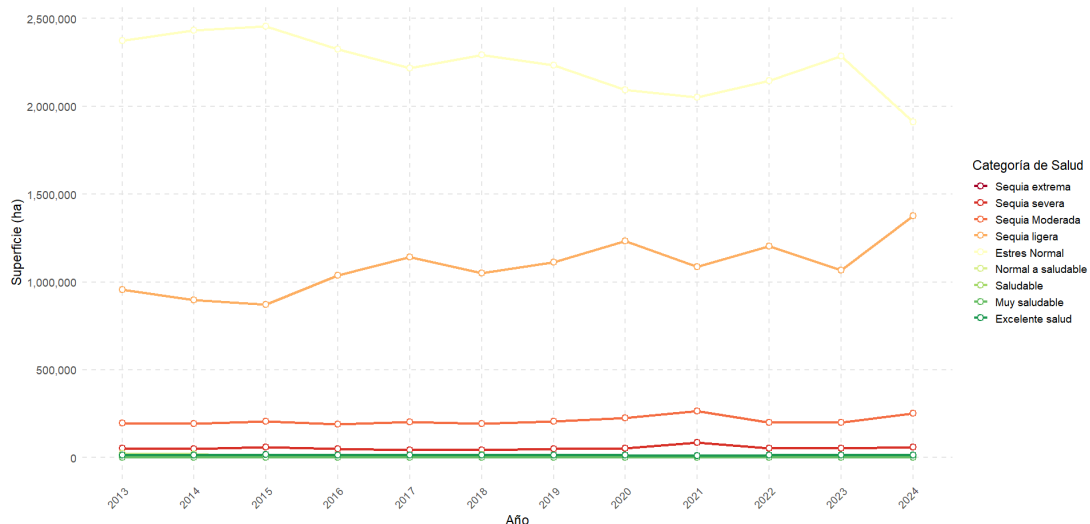


Figura 18. Tendencia de la superficie por categoría de VHI de 2004-2024, Tambopata.

El análisis del área categorizada según los índices de sequía determina que existen diferencias en su sensibilidad y aplicabilidad en la provincia de Tambopata durante la estación seca.

El NMDI (Tabla 6) muestra una homogeneidad extrema, clasificando a toda la provincia como Alta Humedad en todos los años. La uniformidad de 3,62 millones de ha en la categoría indica una saturación del índice en el ecosistema Amazónico de Madre de Dios. El NMDI, en su implementación actual, no puede captar la variabilidad del agua ni los niveles de estrés que se producen durante la estación seca, lo que lo hace inadecuado para el monitoreo de sequías en esta región.

Por el contrario, el NDDI (Tabla 5) y el VHI (Tabla 7) ofrecen una data más detallada y precisa. Ambos índices reportan de manera consistente las condiciones de Alta Humedad y salud de la vegetación, donde una parte considerable de la región se enfrenta a categorías de estrés hídrico. Esto significa que el NDDI considera las áreas como Normales/Transición y Sequía Ligera (Shahabfar y Eitzinger 2011; Du et al. 2013; Sun et al. 2013; Zormand et al. 2017; Shamloo et al. 2022; Tran et al. 2023; Zhu et al. 2024). Caso similar, se ve el VHI, donde predomina el Estrés/Normal y la Sequía Leve, en ambos casos, se indica el nivel de impacto y respuesta de la vegetación (Mohd-Razali et al. 2016; Zormand et al. 2017; Elhag y Zhang 2018; Aksoy et

al. 2019; Sur et al. 2019; Shamloo et al. 2022; Tran et al. 2023; Zhu et al. 2024).

Tanto el NDDI como el VHI reportan que hay áreas afectadas por tipos de sequía más severos (moderada, severa, extrema), aunque en menor medida. Estas áreas, que van desde miles hasta cientos de miles de hectáreas, tienden a crecer durante años secos como 2016 y 2021. La capacidad del NDDI y el VHI para cuantificar y cartografiar las áreas afectadas por diversos niveles de sequía es fundamental para la gestión espacial del riesgo, a diferencia del NMDI, que, en este caso, no muestra signos de estrés hídrico en la región.

4.2 Comparación de índices

El análisis comparativo de los índices NDDI, NMDI y VHI para el monitoreo de sequías en la provincia de Tambopata durante la estación seca (junio-septiembre) muestra variaciones en la sensibilidad y aplicabilidad en la región Amazónica de Madre de Dios.

Los índices NDDI (2004-2024) y VHI (2013-2024) son buenos indicadores del estrés hídrico. Para ambos casos, los patrones temporales son consistentes, con disminuciones en años conocidos como sequía, como lo ocurrido por el fenómeno de El Niño de 2015-2016 y el estrés de 2020-2021 (Gutierrez-Cori 2018; SENAMHI 2021; Villanueva-Baca 2022). La cuantificación de la superficie valida esta eficacia; la mayor parte de Tambopata se clasifica como Humedad Alta/Moderada (NDDI) y Normal/Sana (VHI). Sin embargo, cada año, ambos índices identifican entre cientos de miles y más de un millón de hectáreas afectadas por Sequía Leve y Estrés/Normal.

El NDDI y el VHI también revelan que hay áreas, aunque pequeñas, con Sequía Moderada, Severa y Extrema, que aumentan durante los años de mayor sequía, como 2016 y 2021.

Por otro lado, el NMDI (2004-2024) se mostró ineficiente para vigilar la sequía en Tambopata. Su serie temporal es casi horizontal, y la superficie estima que el 100 % de la zona se clasifica como de Alta Humedad. Esto significa que el índice está saturado por el bosque Amazónico, donde incluso un estrés hídrico

considerable no provoca una respuesta notable en sus valores ni dentro de sus límites preestablecidos. El NMDI no puede detectar la variabilidad del agua ni los períodos de sequía que sí pueden detectar el NDDI y el VHI.

Es importante señalar que, aunque el VHI se ha evaluado desde 2013, su comportamiento durante el período, coincide con el NDDI (2013-2024), presentado un comportamiento similar. Esto hace que el VHI sea más fiable para detectar sequías en la Amazonía, especialmente porque incluye la salud de la vegetación (verdor y temperatura), lo que ofrece una perspectiva diferente a la humedad del suelo y la biomasa que el NDDI puede enfatizar.

Finalmente, el NDDI y el VHI son más fiables y presentan una mayor consistencia para vigilar las sequías en la provincia de Tambopata. Ambos identifican la magnitud y la gravedad de las zonas afectadas por la sequía, desde leves hasta extremas, y sus tendencias temporales reflejan los fenómenos climáticos documentados. Por otro lado, el NMDI no es adecuado para este ecosistema Amazónico, por lo que no debe realizarse mayores pruebas para verificar su fiabilidad.

Tambopata presenta ecosistemas de bosques complejos y dinámicos propios de la Amazonia de Madre de Dios, para comprender el estrés hídrico, es necesario evaluar múltiples índices de teledetección como indicadores de respuesta. Este estudio analizó la eficacia de los índices NDDI, NMDI y VHI. Los resultados revelan que existen diferencias en la eficacia de cada índice para identificar y caracterizar la sequía, así como en la distribución espacial de las categorías de estrés hídrico. La capacidad de la teledetección para crear series temporales y cubrir grandes áreas supone un gran avance en la monitorización de las sequías (Alahacoon y Edirisinghe 2022). Esto fue importante para el estudio de 20 años en Tambopata, ya que ha facilitado el análisis de fenómenos complejos como las sequías en una gran superficie. Sin embargo, la diferencia en el rendimiento de los índices analizados pone en evidencia un aspecto fundamental; no todos los índices son eficaces en todos los ecosistemas o para todos los tipos de sequía. Este estudio confirma la necesidad de una evaluación comparativa, como la realizada por Aksoy et

al. (2019) al analizar el VHI, el NMDI y el NDDI, para encontrar los mejores indicadores en una área específica. Para ello, debe utilizarse plataformas como GEE que ayuden en la eficacia de detección y gestión de la cantidad de datos MODIS (Aksoy et al. 2019) ha sido

El NDDI (2004-2024) y el VHI (2013-2024) son buenos indicadores del estrés hídrico. Sus series temporales reportan disminuciones en sus valores durante los años identificados de sequía, como el fenómeno de El Niño de 2015-2016 y el estrés de 2020-2021 (SENAMHI 2021). Esta coincidencia es importante porque el SENAMHI registró ampliamente el fenómeno de El Niño de 2015-2016 (SENAMHI 2021) como una Sequía Severa en el sur de la Amazonía peruana. Esta conexión refuerza la capacidad del NDDI y el VHI para registrar los efectos de la sequía meteorológica y sus efectos en la vegetación y la humedad del suelo (Zormand et al. 2017; Angearu et al. 2020; Shamloo et al. 2022; Tran et al. 2023).

Por otro lado, la distribución de la superficie afectada confirma esta eficacia. Aunque la mayor parte de Tambopata tiene altas condiciones de humedad y salud, anualmente, ambos índices identifican una parte considerable del territorio en categorías de estrés como Normal/Transición y Sequía Leve. En consecuencia, tanto el NDDI como el VHI estiman áreas muy pequeñas con sequía moderada, severa e incluso extrema. Las áreas afectadas por niveles más altos de sequía tienden a aumentar en años de estrés hídrico más agudo (picos en 2016 y 2021), lo que proporciona una cuantificación esencial del impacto espacial y concuerda con otras investigaciones realizadas en otros espacios (Mohd-Razali et al. 2016; Zormand et al. 2017; Elhag y Zhang 2018; Aksoy et al. 2019; Angearu et al. 2020; Dobri et al. 2021; Shamloo et al. 2022; Tran et al. 2023; Zhu et al. 2024).

El NDDI combina datos de reflectancia que muestran el grado de humedad del suelo y la vegetación con el VHI, que combina el verdor (VCI) y la temperatura superficial (TCI), lo que nos proporciona más información. La respuesta del VHI es especialmente importante porque el estrés en la vegetación a menudo se manifiesta como una pérdida de verdor y un aumento de la temperatura en la capa superior de la vegetación (Swain et al. 2011). La

capacidad de los índices basados en NDVI, que forman parte del VHI, para correlacionarse con el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) durante intervalos de tiempo prolongados (Mikaili y Rahimzadegan 2022) también respalda la solidez del VHI durante el período de análisis de 20 años.

Contrariamente, el NMDI (2004-2024) no es fiable para monitorear la sequía en Tambopata, diferenciándose del NDDI y el VHI. Su serie temporal es casi horizontal (Figura 10), y la superficie (Tabla 6) cuantifica una homogeneidad, con el 100 % de la provincia clasificada como Alta Humedad en todos los años. La falta de variabilidad indica una clara saturación del índice en el ecosistema Amazónico, donde el estrés hídrico considerable no provoca una respuesta notable en sus valores ni dentro de los límites establecidos. Por lo tanto, el NMDI no puede captar la variabilidad hídrica ni los eventos de sequía que identifican el NDDI y el VHI, para este contexto, lo hace ineficiente. Esto respalda la afirmación de Wei et al. (2021) donde la importancia de los índices de sequía varía según el tipo de uso del suelo.

La capacidad del NDDI y el VHI para identificar períodos de estrés hídrico en concordancia con eventos climáticos tiene implicaciones para la gestión del riesgo de sequía en Tambopata. Estos índices pueden utilizarse en el contexto de la reducción del riesgo de desastres y la gestión de los recursos hídricos como;

1. Herramientas de alerta temprana que proporcionan información oportuna sobre las condiciones de sequía, ayudando a las autoridades locales, nacionales (SENAMHI) y a las comunidades a prepararse de manera eficaz. Estos problemas pueden activar protocolos para mitigar los efectos de fenómenos como los incendios forestales o la escasez de agua.
2. La información sobre la distribución espacial y temporal de las categorías de sequía es esencial para la planificación estratégica, ya que es necesaria para la gestión sostenible de los recursos hídricos y la implementación de estrategias de conservación en una región Amazónica altamente vulnerable al cambio climático (Elhag y Zhang 2018; Aksoy et al. 2019; Sur et al. 2019; Angearu et al. 2020; Jayawardhana y Chathurange 2020; Dobri et al. 2021; Wei et al. 2021; Alahacoon y Edirisinghe 2022; Mikaili y Rahimzadegan 2022).

4.3 Evaluación de precisión

Los resultados (Tabla 8-10) muestran dos métricas (precisión general y coeficiente kappa) para evaluar la precisión de NDDI, NMDI y VHI en la provincia de Tambopata durante el período 2004-2024, con la excepción de VHI, que se evaluó desde 2013 hasta 2024.

La precisión global determina el número de píxeles clasificados correctamente en relación con las imágenes Landsat, que en este caso se consideran como referencia de mayor resolución. Para NDDI, los valores de precisión global variaron entre 0,73 (73 %) y 0,78 (78 %), ofreciendo una precisión global superior al 70 %, lo que se considera adecuado para la clasificación de imágenes satelitales, especialmente en paisaje como la Amazonia peruana. Esto significa que el NDDI fue capaz de clasificar correctamente la mayoría de los píxeles en comparación con datos de mayor resolución. No hay mucha variación de un año a otro, lo que demuestra que la clasificación es estable a lo largo del tiempo. En cuanto al coeficiente Kappa, que es una medida más robusta de la precisión, ya que tiene en cuenta la probabilidad de que la coincidencia entre la clasificación y la realidad sobre el terreno se deba al azar. Los valores Kappa del NDDI oscilan entre 0,67 y 0,73 (considerable), demostrando que existe un alto grado de concordancia entre las clasificaciones del NDDI y las imágenes Landsat. Esto es un hallazgo importante porque demuestra que las clasificaciones del NDDI no solo son precisas en términos generales, sino que la concordancia no es meramente aleatoria.

Tabla 8. *Precisión de NDDI con imágenes Landsat*

Año	Precisión general	Coeficiente kappa
2004	0,75	0,69
2005	0,76	0,72
2006	0,73	0,67
2007	0,76	0,70
2008	0,77	0,73
2009	0,75	0,70
2010	0,74	0,69

2011	0,77	0,72
2012	0,74	0,68
2013	0,78	0,73
2014	0,75	0,70
2015	0,76	0,71
2016	0,74	0,69
2017	0,77	0,73
2018	0,76	0,71
2019	0,77	0,72
2020	0,77	0,73
2021	0,76	0,71
2022	0,76	0,72
2023	0,77	0,73
2024	0,75	0,70

La Tabla 9 muestra el coeficiente Kappa y la precisión general del NMDI. Los valores oscilan entre 0,91 (91 %) y 0,94 (94 %). Las presiones altas indican que el NMDI clasificó adecuadamente una proporción considerable de píxeles al compararlos con las imágenes de referencia de Landsat. El coeficiente Kappa se encuentra entre 0,82 y 0,88 (casi perfecto), lo que significa que las clasificaciones del NMDI y Landsat coinciden casi perfectamente.

Según los resultados, nos indica que el índice es muy confiable, lo que sugiere que sería una herramienta muy útil para distinguir las diferentes categorías de humedad y sequía en Tambopata. La consistencia anual demostraría que no se trata de un éxito puntual, sino de un rendimiento duradero. Además, podríamos decir que el ecosistema es lo suficientemente estable como para notar cambios en un lugar tan cambiante como Madre de Dios. También podríamos sugerir una calidad de los datos de entrada. No obstante, según la clasificación (Sequía Severa, Sequía Moderada, Sequía Ligera, Normal a Ligeramente Húmedo, Humedad Moderada, Alta Humedad), solo lo clasifica como Alta Humedad, lo que significa que menos categorías facilitan la precisión, por lo tanto, no hay riesgo de confundirla con otra debido a que solo hay una opción.

Tabla 9. *Precisión de NMDI con imágenes Landsat*

Año	Precisión general	Coefficiente kappa
2004	0,93	0,85
2005	0,93	0,86
2006	0,92	0,83
2007	0,93	0,86
2008	0,94	0,87
2009	0,93	0,85
2010	0,92	0,84
2011	0,93	0,86
2012	0,91	0,82
2013	0,94	0,88
2014	0,93	0,85
2015	0,93	0,86
2016	0,92	0,84
2017	0,94	0,87
2018	0,93	0,86
2019	0,93	0,87
2020	0,94	0,87
2021	0,93	0,86
2022	0,93	0,86
2023	0,93	0,87
2024	0,92	0,84

Por otro lado, los valores de VHI (Tabla 10) revela patrones cruciales sobre la fiabilidad para 2013-2024. Se presenta una precisión general entre el 70% y el 72%, con un Coeficiente Kappa que varía de 0,63 a 0,67 (considerable). Estos valores determinan una concordancia sustancial con la referencia Landsat. La robustez de la precisión de VHI, valida la capacidad para distinguir las categorías de estrés hídrico que fueron observadas. Fortaleciendo en la utilidad de VHI para el monitoreo regional de sequías en la Amazonía.

Tabla 10. *Precisión de VHI con imágenes Landsat*

Año	Precisión general	Coefficiente kappa
2013	0,71	0,64
2014	0,71	0,65
2015	0,70	0,63
2016	0,70	0,64
2017	0,72	0,66

2018	0,71	0,65
2019	0,71	0,66
2020	0,72	0,67
2021	0,70	0,64
2022	0,71	0,65
2023	0,72	0,66
2024	0,70	0,64

Los resultados de precisión confirman que el NDDI, el NMDI y el VHI son herramientas fiables para clasificar y monitorizar las sequías en Tambopata, demostrando que pueden mostrar eficazmente cómo varía el estrés hídrico. Sin embargo, hay que tener una consideración con NMDI, al presentar una única categoría (Alta Humedad), ha facilitado su precisión, en ese sentido debería evaluarse en otros entornos y condiciones. Par el caso de NDDI y VHI, los hallazgos coinciden con autores que evaluaron el estrés hídrico y la salud de la vegetación en diferentes entornos; desde campos agrícolas, suelos con poca cobertura y bosques (Gao 1996; Gu et al. 2007; Wang y Qu 2007; Rahimzadeh Bajgiran et al. 2009; Caccamo et al. 2011; Mohd-Razali et al. 2016; Zormand et al. 2017; Aksoy et al. 2019; Angearu et al. 2020; Dobri et al. 2021; Wei et al. 2021; Alahacoon y Edirisinghe 2022; Mikaili y Rahimzadegan 2022; Shamloo et al. 2022; Tran et al. 2023; Zhu et al. 2024).

CONCLUSIONES

Los índices espectrales NDDI y VHI se han consolidado como indicadores fiables para hacerle seguimiento a la dinámica de humedad y estrés hídrico en la Amazonía de Tambopata en el periodo 2004-2024. Estos índices han logrado identificar los momentos críticos de sequía, como El Niño de 2015-2016 y el estrés hídrico de 2021. El análisis de cuantificación de áreas ha confirmado la vulnerabilidad hídrica del ecosistema, ya que en el año más crítico (2016) el índice NDDI estimó que se vieron afectadas más de 64 800 ha en categorías de sequía moderada, severa y extrema. Por el contrario, el índice NMDI logró clasificar anualmente el 100% de la superficie como "Alta Humedad", este resultado sugiere una saturación del índice en el ecosistema Amazónico de alta biomasa, limitando su uso para la alerta temprana en esta área.

La alta precisión general y los sólidos coeficientes Kappa obtenidos en la clasificación de humedad y sequía confirman que el NDDI es considerable (precisión general de 0,73 a 0,78; Kappa de 0,67 a 0,73), el VHI es considerable (precisión general de 0,70 a 0,72; Kappa de 0,63 a 0,67) y el NMDI es casi perfecto (precisión general de 0,91 a 0,94; Kappa de 0,82 a 0,88), lo que demuestra que son muy eficaces en la capacidad para cartografiar y diferenciar las condiciones de estrés hídrico. Sin embargo, aunque el NMDI es una herramienta valiosa, su interpretación requiere precaución. Sus altos valores de fiabilidad, es producto de la sensibilidad a las condiciones de la vegetación y el clima, lo que puede hacer que sea menos preciso en zonas con poca densidad de vegetación, al registrar solo la humedad superficial y no el agua de las capas más profundas del suelo.

Finalmente, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna, donde el NDDI y el VHI responden mejor y de manera diferente al NMDI en relación con los efectos del estrés por sequía en un ecosistema en la provincia de Tambopata durante el período de 20 años (2004-2024), lo que confirma una mejor respuesta de sus series de tiempo con los eventos históricos de sequía y el

rendimiento estadístico superior, evidenciado un mayor Coeficiente Kappa ($> 0,61$) durante la validación de sus clasificaciones frente a la clasificación de referencia de Landsat.

SUGERENCIAS

Basándose en los resultados de precisión, se recomienda que los esfuerzos futuros se centren en aplicar y adaptar los índices NDDI y VHI al ecosistema Amazónico de Madre de Dios con el fin de maximizar su utilidad. Si bien el NMDI presenta valores altos de precisión, la sensibilidad al estrés hídrico y salud de la vegetación en la provincia de Tambopata es baja, por lo que se propone realizar más pruebas para confirmar los resultados y averiguar qué podría estar causando la baja sensibilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKSOY, S., GORUCU, O. Y SERTEL, E. Drought Monitoring using MODIS derived indices and Google Earth Engine Platform. *2019 8th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)* [Type of Work]. 2019, pp. 1-6. doi:10.1109/Agro-Geoinformatics.2019.8820209.

ALAHACON, N. Y EDIRISINGHE, M. A comprehensive assessment of remote sensing and traditional based drought monitoring indices at global and regional scale. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022/12/31 2022, 13(1), 762-799. doi:10.1080/19475705.2022.2044394

ALARCON-AGUIRRE, G., CANAHUIRE, R. R., GUEVARRA, F. M. G., RODRIGUEZ, L., GALLEGOS, L. E. Y GARATE-QUISPE, J. Dinámica de la pérdida de bosques en el sureste de la Amazonia peruana: un estudio de caso en Madre de Dios. *Ecosistemas*, 2021, 30(2), 2175-2175. doi:<https://doi.org/10.7818/ECOS.2175>

ALARCÓN, G., DÍAZ, J., VELA, M., GARCÍA, M. Y GUTIÉRREZ, J. Deforestación en el sureste de la amazonia del Perú entre los años 1999-2013; caso Regional de Madre de Dios (Puerto Maldonado–Inambari). *Journal of High Andean Research*, 2016, 18(3), 319-330. doi:<http://dx.doi.org/10.18271/ria.2016.221>

ANGEARU, C.-V., ONTEL, I., BOLDEANU, G., MIHAILESCU, D., NERTAN, A., CRACIUNESCU, V., CATANA, S. Y IRIMESCU, A. Multi-Temporal Analysis and Trends of the Drought Based on MODIS Data in Agricultural Areas, Romania. *Remote Sensing* [Type of Work]. 2020, vol. 12, no. 23. ISSN 2072-4292. doi:10.3390/rs12233940.

ANJI-REDDY, M. Geographical Information System. *3rd Edition, BS Publication, Hyderabad* [Type of Work]. 2010. Disponible en Internet:<https://www.gisresources.com/wp-content/uploads/2013/09/anjireddy_GIS.pdf>

ASNER, G. P., DAVID, E. K., ARAVINDH, B. Y GUAYANA, P.-A. Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8/1 2009, 3(1), 033543. doi:10.1117/1.3223675

CACCAMO, G., CHISHOLM, L. A., BRADSTOCK, R. A. Y PUOTINEN, M. L. Assessing the sensitivity of MODIS to monitor drought in high biomass ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2011/10/17/ 2011, 115(10), 2626-2639. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.018>

CERDA, J. Y VILLARROEL, L. Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista chilena de pediatría*, 2008, 79(1), 54-58. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0370-41062008000100008>

COHEN, J. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 1960/04/01 1960, 20(1), 37-46. doi:<https://doi.org/10.1177/001316446002000104>

COHEN, J., MANION, L. Y MORRISON, J. Designing a qualitative study. In.: Newsbury Park: CA Sage, 2003.

DOBRI, R.-V., SFÎCĂ, L., AMIHĂESEI, V.-A., APOSTOL, L. Y ȚÎMPU, S. Drought Extent and Severity on Arable Lands in Romania Derived from Normalized Difference Drought Index (2001–2020). *Remote Sensing* [Type of Work]. 2021, vol. 13, no. 8. ISSN 2072-4292. doi:10.3390/rs13081478.

DU, L., TIAN, Q., YU, T., MENG, Q., JANCZO, T., UDVARDY, P. Y HUANG, Y. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013/08/01/ 2013, 23, 245-253. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.010>

DU, T. L., BUI, D. D., NGUYEN, M. D. Y LEE, H. Satellite-Based, Multi-Indices for Evaluation of Agricultural Droughts in a Highly Dynamic Tropical

Catchment, Central Vietnam. *Water* [Type of Work]. 2018, vol. 10, no. 5. ISSN 2073-4441. doi:10.3390/w10050659.

ELHAG, K. M. Y ZHANG, W. Monitoring and Assessment of Drought Focused on Its Impact on Sorghum Yield over Sudan by Using Meteorological Drought Indices for the Period 2001–2011. *Remote Sensing* [Type of Work]. 2018, vol. 10, no. 8. ISSN 2072-4292. doi:10.3390/rs10081231.

ELIJAH, R. Y JENSEN, J. R. Remote sensing of mangrove wetlands: relating canopy spectra to site-specific data 1996. doi:https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1996journal/aug/1996_aug_939-948.pdf

FAO Terms and Definitions 2012. doi:<https://www.fao.org/home/es>

FAO Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 – Principales resultados 2020, 16. doi:<https://doi.org/10.4060/ca8753es>

GAO, B.-C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996/12/01/ 1996, 58(3), 257-266. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

GOREMAD Y IIAP. Macro Zonificación Ecológica Económica de Madre de Dios. In G.D.R.N.Y.M. AMBIENTE. Madre de Dios - Perú, 2009, p. 208.

GU, Y., BROWN, J. F., VERDIN, J. P. Y WARDLOW, B. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical research letters*, 2007/03/01 2007, 34(6). doi:<https://doi.org/10.1029/2006GL029127>

GULÁCSI, A. Y KOVÁCS, F. Drought Monitoring With Spectral Indices Calculated From Modis Satellite Images In Hungary. *Journal of Environmental Geography*, 12/30 2015, 8(3-4), 11-20. doi:10.1515/jengeo-2015-0008

GUTIERREZ-CORI, O. E. Estimación de índices de sequía mediante sensoramiento remoto integrando MODIS y TRMM en la cuenca andino-amazónica, Perú 2018.

HOLDRIDGE, L. R. Life zone ecology. Life zone ecology., 1967, (rev. ed.)).

JAYAWARDHANA, W. Y CHATHURANGE, V. M. I. Investigate the sensitivity of the satellite-based agricultural drought indices to monitor the drought condition of paddy and introduction to enhanced multi-temporal drought indices. *Journal of Remote Sensing and GIS*, 2020, 9, 272. doi:10.35248/2469-4134.20.9.272

JENSEN, J. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Edtion ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.

JENSEN, J. R. *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e*. Edtion ed.: Pearson Education India, 2009. ISBN 8131716805.

KOGAN, F. N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 1995/01/01/ 1995a, 15(11), 91-100. doi:[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)

KOGAN, F. N. Droughts of the Late 1980s in the United States as Derived from NOAA Polar-Orbiting Satellite Data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 01 May. 1995 1995b, 76(5), 655-668. doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2)

LANDIS, J. R. Y KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics*, 1977, 159-174. doi:<https://doi.org/10.2307/2529310>

LEÓN, R. A. H. Y GONZÁLEZ, S. C. *El proceso de investigación científica*. Edtion ed.: Editorial Universitaria (Cuba), 2020. ISBN 9591613075.

LOZANO, N. S. M., BAQUE, D. L. Z., TERÁN, A. B. I., PARRALES, R. A. Á., ALCÍVAR, H. A. G., BRAVO, H. M. T., BRAVO, B. J. P. Y ROBLES, N. A. P. Metodología de la Investigación Científica: Diseño de Investigaciones Cuantitativas. Editorial Internacional Alema, 2025.

MARTÍNEZ-CASTRO, D. Interpretación de eventos recientes de sequías extremas en la cuenca amazónica peruana. Instituto Geofísico del Perú - Ciencia Climática, 2024, 1(1), 1-10.

MIKAILI, O. Y RAHIMZADEGAN, M. Investigating remote sensing indices to monitor drought impacts on a local scale (case study: Fars province, Iran). Natural Hazards, 2022/04/01 2022, 111(3), 2511-2529. doi:10.1007/s11069-021-05146-1

MOHD-RAZALI, S., MARIN ATUCHA, A. A., NURUDDIN, A. A., ABDUL HAMID, H. Y MOHD SHAFRI, H. Z. Monitoring vegetation drought using MODIS remote sensing indices for natural forest and plantation areas. Journal of Spatial Science, 2016/01/02 2016, 61(1), 157-172. doi:10.1080/14498596.2015.1084247

MUTANGA, O. Y KUMAR, L. Google Earth Engine Applications. *Remote Sensing* [Type of Work]. 2019, vol. 11, no. 5. ISSN 2072-4292. doi:10.3390/rs11050591.

OCHOA, C. Y PÁEZ, O. Inferencia estadística: probabilidad, variables aleatorias y distribuciones de probabilidad. Evid Pediatr, 2019, 15, 27.

RAHIMZADEH BAJGIRAN, P., SHIMIZU, Y., HOSOI, F. Y OMASA, K. MODIS vegetation and water indices for drought assessment in semi-arid ecosystems of Iran. 農業気象, 2009, 65(4), 349-355. doi:10.2480/agrmet.65.4.4

SENAMHI En la selva preparémonos para la llegada de los friajes 2015. doi:<https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-meteorologico>

SENAMHI Reporte de condiciones secas y húmedas en el Perú durante el año hidrológico 2000-2021 2021.

doi:<https://www.senamhi.gob.pe/pdf/estudios/reporte-condiciones-secas-2020-2021-DAM.pdf>

SHAHABFAR, A. Y EITZINGER, J. Agricultural drought monitoring in semi-arid and arid areas using MODIS data. *The Journal of Agricultural Science*, 2011, 149(4), 403-414. doi:10.1017/S0021859610001309

SHAHABFAR, A., GHULAM, A. Y EITZINGER, J. Drought monitoring in Iran using the perpendicular drought indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012/08/01/ 2012, 18, 119-127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.01.011>

SHAMLOO, N., SATTARI, M. T. Y APAYDIN, H. Agricultural drought survey using MODIS-based image indices at the regional scale: case study of the Urmia Lake Basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022/07/01 2022, 149(1), 39-51. doi:10.1007/s00704-022-04023-6

SUN, H., ZHAO, X., CHEN, Y., GONG, A. Y YANG, J. A new agricultural drought monitoring index combining MODIS NDWI and day–night land surface temperatures: a case study in China. *International journal of remote sensing*, 2013/12/20 2013, 34(24), 8986-9001. doi:10.1080/01431161.2013.860659

SUR, C., PARK, S.-Y., KIM, T.-W. Y LEE, J.-H. Remote Sensing-based Agricultural Drought Monitoring using Hydrometeorological Variables. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019/12/01 2019, 23(12), 5244-5256. doi:10.1007/s12205-019-2242-0

SWAIN, S., WARDLOW, B. D., NARUMALANI, S., TADESSE, T. Y CALLAHAN, K. Assessment of Vegetation Response to Drought in Nebraska Using Terra-MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index. *GIScience & Remote Sensing*, 2011/07/01 2011, 48(3), 432-455. doi:10.2747/1548-1603.48.3.432

TRAN, H. T., CAMPBELL, J. B., TRAN, T. D. Y TRAN, H. T. Monitoring drought vulnerability using multispectral indices observed from sequential remote sensing (Case Study: Tuy Phong, Binh Thuan, Vietnam). *GIScience & Remote Sensing*, 2017/03/04 2017, 54(2), 167-184. doi:10.1080/15481603.2017.1287838

TRAN, T. V., BRUCE, D., HUANG, C.-Y., TRAN, D. X., MYINT, S. W. Y NGUYEN, D. B. Decadal assessment of agricultural drought in the context of land use land cover change using MODIS multivariate spectral index time-series data. *GIScience & Remote Sensing*, 2023/12/31 2023, 60(1), 2163070. doi:10.1080/15481603.2022.2163070

VILLANUEVA-BACA, K. L. Dinámica temporal y espacial del índice de vegetación estandarizado (SVI) para tres zonas cafetaleras en la región Amazonas, Perú 2022.

WANG, L. Y QU, J. J. NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysical research letters*, 2007/10/01 2007, 34(20). doi:<https://doi.org/10.1029/2007GL031021>

WANG, L., QU, J. J. Y HAO, X. Forest fire detection using the normalized multi-band drought index (NMDI) with satellite measurements. *Agricultural and forest meteorology*, 2008/10/01/ 2008, 148(11), 1767-1776. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.06.005>

WEI, W., ZHANG, J., ZHOU, L., XIE, B., ZHOU, J. Y LI, C. Comparative evaluation of drought indices for monitoring drought based on remote sensing data. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021/04/01 2021, 28(16), 20408-20425. doi:10.1007/s11356-020-12120-0

WHITMORE, T. C. Y BURNHAM, C. P. *Tropical rain forests of the Far East*. Edtion ed.: Clarendon Press, 1975. ISBN 0198541279.

ZHANG, G., WANG, J., XUE, Y., ZHANG, C., XU, B., CHENG, Y. Y REN, Y. Comparison of sampling effort allocation strategies in a stratified random survey with multiple objectives. *Aquaculture and Fisheries*, 2020/05/01/ 2020, 5(3), 113-121. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aaf.2020.02.002>

ZHU, X., LI, Q. Y GUO, C. Evaluation of the monitoring capability of various vegetation indices and mainstream satellite band settings for grassland drought. *Ecological Informatics*, 2024/09/01/ 2024, 82, 102717. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102717>

ZORMAND, S., JAFARI, R. Y KOU PAEI, S. S. Assessment of PDI, MPDI and TVDI drought indices derived from MODIS Aqua/Terra Level 1B data in natural lands. *Natural Hazards*, 2017/03/01 2017, 86(2), 757-777. doi:10.1007/s11069-016-2715-0

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia,

Título: Monitoreo de sequía mediante índices espectrales del satélite MODIS en un ecosistema de la Amazonia de Madre de Dios.

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES/INDICADORES	METODOLOGÍA
¿Cuáles y como son las condiciones de sequía mediante índices espectrales del satélite MODIS en un ecosistema de la provincia de Tambopata, Amazonia de Madre de Dios durante un período de veinte años (2004-2024)?	Monitorear las condiciones de sequía mediante índices espectrales del satélite MODIS en un ecosistema de la provincia de Tambopata, Amazonia de Madre de Dios durante un período de veinte años (2004-2024).	El índice de diferencia de sequía normalizado (NDDI) y el índice de salud de la vegetación (VHI) no responden mejor y de manera diferente que el índice de sequía multibanda normalizado (NMDI) en relación con los efectos del estrés por sequía en un ecosistema en la provincia de Tambopata durante el período de 20 años (2004-2024).	<p>Variable Dependiente: condiciones de sequía en un ecosistema de la Amazonia de Madre de Dios en un periodo de veinte años (2004-2024).</p> <p>Indicadores: condiciones de sequía.</p> <p>Variable Independiente: Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI), Índice de Salud de la Vegetación (VHI) e Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI).</p> <p>Indicadores: cuantificación de sequía; adicional, extrema, moderada, leve y sin sequía</p>	<p>Diseño: no experimental Transaccional (transversal) y longitudinal. Tipo: descriptiva, correlacional y predictivo Método:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Descarga de imágenes MODIS y Landsat. 2. Preprocesamiento y enmascaramiento 3. Índices espectrales de sequía. 4. Validación de los resultados con imágenes Landsat. 5. Comparación de índices de sequía de una serie temporal de 20 años. <p>Población y muestra: se empleará la distribución binomial de probabilidad.</p> $n = \frac{Z^2 p(qN)}{(N - 1)E^2 + Z^2 pq}$ <p>“Z: Es el valor de la curva normal estandarizada para un nivel determinado de probabilidad, 1,96 (95%)”.</p> <p>“p: indica el porcentaje de aciertos estimado, 0,50 (50%)”.</p> <p>“q: Indica el porcentaje de errores (q = 1 – p), 0,50 (50%)”.</p> <p>“N: Tamaño de la población”.</p> <p>“E: El error permitido, 0,05 (5%)”.</p>
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS			
<p>P.E.1 ¿Cuáles son las series temporales del Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI), Índice de Salud de la Vegetación (VHI) e Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI) en un ecosistema de la provincia de Tambopata durante un periodo de veinte años (2004-2024)?</p> <p>P.E.2 ¿Cuál es el comportamiento de la efectividad temática y precisión de los índices espectrales (NDDI, VHI y NMDI) en un ecosistema de la provincia de Tambopata, evaluando la robustez de cada índice durante un periodo de veinte años (2004-2024)?</p>	<p>O.E.1 Determinar la serie temporal del Índice de sequía de diferencia normalizada (NDDI), Índice de Salud de la Vegetación (VHI) e Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI) en un ecosistema de la provincia de Tambopata durante un periodo de veinte años (2004-2024).</p> <p>O.E.2 Comparar la efectividad temática y precisión de los índices espectrales (NDDI, VHI y NMDI) en un ecosistema de la provincia de Tambopata, evaluando la robustez de cada índice durante un periodo de veinte años (2004-2024).</p>			

Anexo 2. Puntos de muestreo distribuidos al azar por clases en el área de estudio para NDDI.

N.º	Categoría	Este	Norte
1	Sequia extrema	294784	8683090
2	Sequia extrema	441241	8563629
3	Sequia extrema	256358	8755848
4	Sequia extrema	362843	8638627
5	Sequia extrema	501034	8584167
6	Sequia extrema	498230	8643300
7	Sequia extrema	472355	8588730
8	Sequia extrema	386583	8550585
9	Sequia extrema	379849	8583357
10	Sequia extrema	403123	8659564
11	Sequia extrema	469566	8641725
12	Sequia extrema	441792	8563914
13	Sequia extrema	387481	8594518
14	Sequia extrema	486583	8647603
15	Sequia extrema	488277	8624599
16	Sequia extrema	289943	8733137
17	Sequia extrema	486490	8656170
18	Sequia extrema	385036	8603998
19	Sequia extrema	390793	8589902
20	Sequia extrema	352387	8559572
21	Sequia extrema	375479	8556246
22	Sequia extrema	398305	8692372
23	Sequia extrema	391153	8692378
24	Sequia extrema	465071	8642980
25	Sequia extrema	481679	8619857
26	Sequia extrema	512427	8577154
27	Sequia extrema	235612	8756457
28	Sequia extrema	331309	8730508
29	Sequia extrema	389027	8591378
30	Sequia extrema	449742	8638062
31	Sequia extrema	403889	8565443
32	Sequia extrema	417381	8605331
33	Sequia extrema	477177	8594127
34	Sequia extrema	456829	8590117
35	Sequia extrema	323053	8728682
36	Sequia extrema	339295	8699793
37	Sequia extrema	277622	8742512
38	Sequia extrema	392946	8631532
39	Sequia extrema	519898	8608111
40	Sequia extrema	423646	8594679
41	Sequia extrema	395795	8534569
42	Sequia extrema	500529	8619044
43	Sequia extrema	257423	8746486

44	Sequia extrema	386252	8689016
45	Sequia extrema	366475	8662856
46	Sequia extrema	276654	8751504
47	Sequia extrema	456519	8649603
48	Sequia extrema	370719	8640883
49	Sequia extrema	433723	8695243
50	Sequia extrema	378433	8629879
51	Sequia extrema	416433	8559427
52	Sequia extrema	439356	8611930
53	Sequia extrema	448552	8629547
54	Sequia extrema	465603	8605316
55	Sequia extrema	233914	8756634
56	Sequia extrema	471349	8633022
57	Sequia extrema	479992	8606746
58	Sequia extrema	394080	8575365
59	Sequia extrema	330656	8734039
60	Sequia extrema	413264	8613273
61	Sequia extrema	501829	8596618
62	Sequia extrema	295593	8684660
63	Sequia severa	390510	8558002
64	Sequia severa	425524	8684549
65	Sequia severa	351889	8540142
66	Sequia severa	519291	8623801
67	Sequia severa	181166	8749862
68	Sequia severa	515509	8615973
69	Sequia severa	181784	8746420
70	Sequia severa	464690	8582017
71	Sequia severa	478776	8607446
72	Sequia severa	428741	8525426
73	Sequia severa	479348	8656112
74	Sequia severa	370164	8664030
75	Sequia severa	470505	8614148
76	Sequia severa	431335	8553406
77	Sequia severa	431002	8547237
78	Sequia severa	476258	8568992
79	Sequia severa	472810	8660717
80	Sequia severa	371837	8703939
81	Sequia severa	493008	8650820
82	Sequia severa	487177	8632489
83	Sequia severa	277588	8737071
84	Sequia severa	371598	8636779
85	Sequia severa	368393	8708739
86	Sequia severa	313164	8677945
87	Sequia severa	469744	8615040
88	Sequia severa	403671	8547760
89	Sequia severa	187845	8766397
90	Sequia severa	512122	8620547

91	Sequia severa	511736	8601332
92	Sequia severa	485917	8605074
93	Sequia severa	376340	8551132
94	Sequia severa	315160	8697973
95	Sequia severa	440826	8572634
96	Sequia severa	479676	8632155
97	Sequia severa	415365	8568954
98	Sequia severa	508164	8635592
99	Sequia severa	428475	8630804
100	Sequia severa	481494	8612748
101	Sequia severa	288181	8688481
102	Sequia severa	401718	8588596
103	Sequia severa	491815	8632516
104	Sequia severa	474319	8606612
105	Sequia severa	463218	8607765
106	Sequia severa	506933	8579210
107	Sequia severa	448381	8586247
108	Sequia severa	354768	8727582
109	Sequia severa	440179	8612498
110	Sequia severa	400259	8684586
111	Sequia severa	467332	8645692
112	Sequia severa	200674	8767886
113	Sequia severa	508790	8663080
114	Sequia severa	397008	8573883
115	Sequia severa	475763	8617790
116	Sequia severa	437284	8551633
117	Sequia severa	408206	8632803
118	Sequia severa	367531	8692740
119	Sequia severa	460883	8581081
120	Sequia severa	435463	8549409
121	Sequia severa	242237	8763687
122	Sequia severa	485043	8659137
123	Sequia severa	292559	8683442
124	Sequia severa	497204	8625852
125	Sequia moderada	428570	8525002
126	Sequia moderada	345419	8734218
127	Sequia moderada	492324	8618134
128	Sequia moderada	491084	8648145
129	Sequia moderada	405547	8543494
130	Sequia moderada	368137	8631920
131	Sequia moderada	369654	8715232
132	Sequia moderada	425060	8694530
133	Sequia moderada	457304	8589989
134	Sequia moderada	405847	8530784
135	Sequia moderada	459365	8655006
136	Sequia moderada	369931	8640274
137	Sequia moderada	457126	8640929

138	Sequia moderada	388997	8562517
139	Sequia moderada	446010	8608089
140	Sequia moderada	350983	8657822
141	Sequia moderada	389720	8617523
142	Sequia moderada	490412	8611996
143	Sequia moderada	339080	8726223
144	Sequia moderada	487906	8626118
145	Sequia moderada	385864	8666432
146	Sequia moderada	225893	8733897
147	Sequia moderada	386760	8620125
148	Sequia moderada	293324	8743257
149	Sequia moderada	468704	8670775
150	Sequia moderada	376206	8668337
151	Sequia moderada	298721	8737731
152	Sequia moderada	484838	8675055
153	Sequia moderada	423641	8608631
154	Sequia moderada	309970	8703251
155	Sequia moderada	356372	8570382
156	Sequia moderada	190016	8774648
157	Sequia moderada	369065	8647376
158	Sequia moderada	435430	8567538
159	Sequia moderada	308706	8707514
160	Sequia moderada	310798	8677362
161	Sequia moderada	479517	8653198
162	Sequia moderada	478379	8615773
163	Sequia moderada	262100	8708293
164	Sequia moderada	384752	8582547
165	Sequia moderada	484338	8667327
166	Sequia moderada	342823	8702636
167	Sequia moderada	459694	8634076
168	Sequia moderada	349731	8677914
169	Sequia moderada	418016	8546346
170	Sequia moderada	438920	8599192
171	Sequia moderada	493447	8680429
172	Sequia moderada	472228	8545208
173	Sequia moderada	518975	8621919
174	Sequia moderada	311346	8711964
175	Sequia moderada	422380	8616258
176	Sequia moderada	366156	8558707
177	Sequia moderada	506012	8584695
178	Sequia moderada	484961	8557545
179	Sequia moderada	454022	8637843
180	Sequia moderada	211618	8771526
181	Sequia moderada	350332	8663044
182	Sequia moderada	509894	8571605
183	Sequia moderada	464170	8623737
184	Sequia moderada	416438	8530737

185	Sequia moderada	357880	8686343
186	Sequia moderada	481085	8614881
187	Sequia ligera	484899	8607021
188	Sequia ligera	522006	8607061
189	Sequia ligera	394510	8579186
190	Sequia ligera	296261	8693027
191	Sequia ligera	393362	8568008
192	Sequia ligera	442281	8637702
193	Sequia ligera	504193	8573251
194	Sequia ligera	409763	8592848
195	Sequia ligera	389257	8688708
196	Sequia ligera	472739	8568665
197	Sequia ligera	283287	8699122
198	Sequia ligera	429618	8613378
199	Sequia ligera	459731	8544796
200	Sequia ligera	391323	8547488
201	Sequia ligera	386541	8573703
202	Sequia ligera	364831	8634507
203	Sequia ligera	337233	8702245
204	Sequia ligera	340162	8731426
205	Sequia ligera	225962	8734167
206	Sequia ligera	321840	8729053
207	Sequia ligera	309054	8737417
208	Sequia ligera	382229	8695680
209	Sequia ligera	200618	8772140
210	Sequia ligera	441666	8597062
211	Sequia ligera	243851	8725713
212	Sequia ligera	439852	8615525
213	Sequia ligera	499799	8565264
214	Sequia ligera	380058	8674034
215	Sequia ligera	335980	8667305
216	Sequia ligera	378988	8562353
217	Sequia ligera	321580	8726217
218	Sequia ligera	377623	8568305
219	Sequia ligera	259728	8731493
220	Sequia ligera	384287	8539816
221	Sequia ligera	499216	8650688
222	Sequia ligera	491391	8657006
223	Sequia ligera	491459	8567603
224	Sequia ligera	343889	8728313
225	Sequia ligera	502326	8637223
226	Sequia ligera	402424	8626704
227	Sequia ligera	503944	8582948
228	Sequia ligera	196918	8757567
229	Sequia ligera	386481	8561604
230	Sequia ligera	385388	8691654
231	Sequia ligera	453352	8631535

232	Sequia ligera	511424	8578048
233	Sequia ligera	477377	8636243
234	Sequia ligera	445010	8549404
235	Sequia ligera	403879	8584052
236	Sequia ligera	313229	8681187
237	Sequia ligera	434322	8561555
238	Sequia ligera	484083	8634507
239	Sequia ligera	483849	8627358
240	Sequia ligera	399488	8570877
241	Sequia ligera	413896	8534808
242	Sequia ligera	490717	8574938
243	Sequia ligera	370771	8712627
244	Sequia ligera	414030	8591155
245	Sequia ligera	375160	8641685
246	Sequia ligera	453081	8577330
247	Sequia ligera	385868	8570425
248	Sequia ligera	461142	8600760
249	Normal /Transición	417782	8618333
250	Normal /Transición	428339	8698164
251	Normal /Transición	503541	8651601
252	Normal /Transición	476689	8588679
253	Normal /Transición	480152	8614983
254	Normal /Transición	360483	8644743
255	Normal /Transición	355905	8560207
256	Normal /Transición	489180	8610486
257	Normal /Transición	480899	8643223
258	Normal /Transición	457169	8603159
259	Normal /Transición	466244	8678085
260	Normal /Transición	447460	8636290
261	Normal /Transición	499675	8606361
262	Normal /Transición	375744	8580263
263	Normal /Transición	265085	8737453
264	Normal /Transición	340447	8725613
265	Normal /Transición	505378	8653575
266	Normal /Transición	482660	8553544
267	Normal /Transición	449644	8585671
268	Normal /Transición	497591	8576721
269	Normal /Transición	479748	8627801
270	Normal /Transición	153748	8756436
271	Normal /Transición	396404	8665405
272	Normal /Transición	367394	8542760
273	Normal /Transición	468320	8639598
274	Normal /Transición	446499	8614406
275	Normal /Transición	443307	8557523
276	Normal /Transición	480431	8634630
277	Normal /Transición	483448	8565012
278	Normal /Transición	378246	8688579

279	Normal /Transición	264820	8744425
280	Normal /Transición	442437	8593588
281	Normal /Transición	475691	8619495
282	Normal /Transición	505972	8629316
283	Normal /Transición	411939	8565792
284	Normal /Transición	404960	8594951
285	Normal /Transición	388597	8544766
286	Normal /Transición	449228	8638089
287	Normal /Transición	274146	8705218
288	Normal /Transición	479002	8652699
289	Normal /Transición	443117	8626626
290	Normal /Transición	472812	8630325
291	Normal /Transición	490629	8616672
292	Normal /Transición	487484	8612264
293	Normal /Transición	501626	8635269
294	Normal /Transición	453159	8604966
295	Normal /Transición	391272	8705947
296	Normal /Transición	232251	8726506
297	Normal /Transición	479937	8576261
298	Normal /Transición	357407	8644526
299	Normal /Transición	397785	8578364
300	Normal /Transición	356695	8658028
301	Normal /Transición	293807	8684050
302	Normal /Transición	469264	8667972
303	Normal /Transición	435628	8571828
304	Normal /Transición	456104	8601199
305	Normal /Transición	224726	8744192
306	Normal /Transición	451776	8661866
307	Normal /Transición	390093	8578345
308	Normal /Transición	417222	8589979
309	Normal /Transición	376623	8621375
310	Normal /Transición	469462	8615723
311	Humedad ligera	482910	8656476
312	Humedad ligera	474760	8637335
313	Humedad ligera	464617	8625833
314	Humedad ligera	472006	8643814
315	Humedad ligera	360607	8652233
316	Humedad ligera	473495	8607862
317	Humedad ligera	394674	8601501
318	Humedad ligera	422468	8592855
319	Humedad ligera	458625	8612691
320	Humedad ligera	450813	8544435
321	Humedad ligera	370601	8683908
322	Humedad ligera	378836	8619572
323	Humedad ligera	521675	8591835
324	Humedad ligera	458938	8644263
325	Humedad ligera	447961	8637983

326	Humedad ligera	495220	8586969
327	Humedad ligera	485572	8651454
328	Humedad ligera	362230	8647615
329	Humedad ligera	366373	8548709
330	Humedad ligera	398087	8677310
331	Humedad ligera	462750	8549395
332	Humedad ligera	510089	8575813
333	Humedad ligera	403366	8613394
334	Humedad ligera	358745	8644694
335	Humedad ligera	331987	8687778
336	Humedad ligera	250228	8710095
337	Humedad ligera	483682	8664845
338	Humedad ligera	301139	8684198
339	Humedad ligera	388069	8632402
340	Humedad ligera	401273	8673106
341	Humedad ligera	475769	8601658
342	Humedad ligera	445047	8576812
343	Humedad ligera	388993	8595497
344	Humedad ligera	288621	8686420
345	Humedad ligera	344656	8726847
346	Humedad ligera	327770	8687779
347	Humedad ligera	435496	8626187
348	Humedad ligera	473568	8556773
349	Humedad ligera	385695	8563008
350	Humedad ligera	211030	8744913
351	Humedad ligera	394190	8619342
352	Humedad ligera	245010	8725680
353	Humedad ligera	428338	8552066
354	Humedad ligera	441663	8599336
355	Humedad ligera	467790	8663511
356	Humedad ligera	380529	8697440
357	Humedad ligera	356401	8562764
358	Humedad ligera	293398	8712520
359	Humedad ligera	162161	8747452
360	Humedad ligera	404793	8595257
361	Humedad ligera	496040	8638634
362	Humedad ligera	420605	8530283
363	Humedad ligera	388841	8570111
364	Humedad ligera	436601	8628993
365	Humedad ligera	484378	8639370
366	Humedad ligera	488562	8632968
367	Humedad ligera	307968	8678922
368	Humedad ligera	391233	8570851
369	Humedad ligera	501547	8616779
370	Humedad ligera	469925	8622492
371	Humedad ligera	150444	8747792
372	Humedad ligera	462398	8645040

373	Humedad moderada	461423	8605934
374	Humedad moderada	433351	8616263
375	Humedad moderada	504866	8632743
376	Humedad moderada	266385	8751160
377	Humedad moderada	424178	8573280
378	Humedad moderada	287275	8747880
379	Humedad moderada	331044	8700156
380	Humedad moderada	486125	8626883
381	Humedad moderada	447165	8640476
382	Humedad moderada	431391	8538639
383	Humedad moderada	377935	8675605
384	Humedad moderada	462525	8586157
385	Humedad moderada	444138	8568915
386	Humedad moderada	175460	8741740
387	Humedad moderada	488722	8642905
388	Humedad moderada	401730	8536911
389	Humedad moderada	450601	8622120
390	Humedad moderada	482696	8587216
391	Humedad moderada	502188	8606996
392	Humedad moderada	439119	8600682
393	Humedad moderada	369937	8541980
394	Humedad moderada	376160	8549167
395	Humedad moderada	396441	8617180
396	Humedad moderada	439579	8564522
397	Humedad moderada	489560	8597138
398	Humedad moderada	445286	8600983
399	Humedad moderada	281755	8706314
400	Humedad moderada	313707	8676030
401	Humedad moderada	382871	8633552
402	Humedad moderada	487411	8605342
403	Humedad moderada	423182	8590157
404	Humedad moderada	385005	8574401
405	Humedad moderada	222160	8741990
406	Humedad moderada	419037	8625097
407	Humedad moderada	469099	8606063
408	Humedad moderada	496250	8679889
409	Humedad moderada	450551	8622491
410	Humedad moderada	447338	8630084
411	Humedad moderada	225582	8736153
412	Humedad moderada	478615	8650615
413	Humedad moderada	366144	8696914
414	Humedad moderada	328853	8694631
415	Humedad moderada	455748	8659132
416	Humedad moderada	385586	8705037
417	Humedad moderada	385734	8577120
418	Humedad moderada	382766	8565951
419	Humedad moderada	483795	8617796

420	Humedad moderada	507670	8590837
421	Humedad moderada	248364	8734383
422	Humedad moderada	425246	8530199
423	Humedad moderada	474078	8544485
424	Humedad moderada	271935	8723106
425	Humedad moderada	447426	8569927
426	Humedad moderada	525204	8636461
427	Humedad moderada	429339	8608062
428	Humedad moderada	493053	8621545
429	Humedad moderada	379154	8675703
430	Humedad moderada	480607	8624311
431	Humedad moderada	359738	8699964
432	Humedad moderada	245918	8763411
433	Humedad moderada	401201	8603464
434	Humedad moderada	365888	8703458
435	Alta humedad	263266	8731648
436	Alta humedad	465315	8658304
437	Alta humedad	517607	8633777
438	Alta humedad	401529	8567379
439	Alta humedad	491476	8683215
440	Alta humedad	375374	8562361
441	Alta humedad	278836	8689235
442	Alta humedad	282813	8730385
443	Alta humedad	383414	8549642
444	Alta humedad	298090	8733575
445	Alta humedad	364302	8696980
446	Alta humedad	435321	8691866
447	Alta humedad	533139	8621167
448	Alta humedad	374151	8575839
449	Alta humedad	448416	8596084
450	Alta humedad	476179	8600726
451	Alta humedad	359920	8567956
452	Alta humedad	332258	8731084
453	Alta humedad	466443	8613060
454	Alta humedad	415878	8558163
455	Alta humedad	524154	8622694
456	Alta humedad	488070	8638252
457	Alta humedad	458664	8620222
458	Alta humedad	302832	8685787
459	Alta humedad	442525	8640116
460	Alta humedad	459937	8548147
461	Alta humedad	256472	8704427
462	Alta humedad	407032	8601788
463	Alta humedad	481768	8637389
464	Alta humedad	486581	8665810
465	Alta humedad	495436	8601176
466	Alta humedad	323220	8734236

467	Alta humedad	482139	8620125
468	Alta humedad	485838	8613326
469	Alta humedad	432488	8684201
470	Alta humedad	264150	8736510
471	Alta humedad	533151	8621927
472	Alta humedad	368330	8665317
473	Alta humedad	407551	8597288
474	Alta humedad	376101	8676034
475	Alta humedad	280292	8739193
476	Alta humedad	366938	8638474
477	Alta humedad	497643	8633074
478	Alta humedad	390306	8574725
479	Alta humedad	441718	8567979
480	Alta humedad	361526	8637779
481	Alta humedad	485261	8645039
482	Alta humedad	485187	8677774
483	Alta humedad	394319	8545267
484	Alta humedad	477694	8676867
485	Alta humedad	371748	8679515
486	Alta humedad	476437	8649404
487	Alta humedad	388200	8579201
488	Alta humedad	368562	8700898
489	Alta humedad	446279	8556364
490	Alta humedad	253729	8710329
491	Alta humedad	294144	8721164
492	Alta humedad	470522	8650560
493	Alta humedad	449736	8623339
494	Alta humedad	474554	8597613
495	Alta humedad	388348	8585064
496	Alta humedad	535150	8616104
497	Alta humedad	381851	8633248
498	Alta humedad	466189	8610454
499	Alta humedad	465599	8617984
500	Alta humedad	284149	8749644

Anexo 3. Puntos de muestreo distribuidos al azar por clases en el área de estudio para NMDI.

N.º	Categoría	Este	Norte
1	Alta humedad	506297	8582003
2	Alta humedad	350649	8725705
3	Alta humedad	413992	8552283
4	Alta humedad	363734	8665814
5	Alta humedad	521747	8618590
6	Alta humedad	430273	8675923
7	Alta humedad	451377	8679643
8	Alta humedad	283110	8735088
9	Alta humedad	368903	8579643
10	Alta humedad	409447	8683168
11	Alta humedad	345299	8675589
12	Alta humedad	399736	8630297
13	Alta humedad	466169	8606731
14	Alta humedad	424743	8611807
15	Alta humedad	174851	8745881
16	Alta humedad	370226	8655320
17	Alta humedad	454112	8681426
18	Alta humedad	203603	8748628
19	Alta humedad	344997	8682422
20	Alta humedad	368286	8577688
21	Alta humedad	453999	8678685
22	Alta humedad	466901	8657525
23	Alta humedad	501865	8563672
24	Alta humedad	170384	8752507
25	Alta humedad	406949	8597001
26	Alta humedad	385190	8584354
27	Alta humedad	381851	8555648
28	Alta humedad	318022	8691245
29	Alta humedad	402431	8646181
30	Alta humedad	361984	8707939
31	Alta humedad	465994	8600629
32	Alta humedad	408282	8630151
33	Alta humedad	422259	8575920
34	Alta humedad	432586	8689544
35	Alta humedad	277347	8741158
36	Alta humedad	334420	8724596
37	Alta humedad	271471	8747490
38	Alta humedad	461891	8617551
39	Alta humedad	405602	8615275
40	Alta humedad	350621	8723218
41	Alta humedad	378590	8697433

42	Alta humedad	320158	8727303
43	Alta humedad	411189	8637128
44	Alta humedad	292166	8751038
45	Alta humedad	500855	8629624
46	Alta humedad	384815	8534427
47	Alta humedad	404559	8649124
48	Alta humedad	415876	8632496
49	Alta humedad	338966	8668339
50	Alta humedad	410551	8589148
51	Alta humedad	441809	8551320
52	Alta humedad	298893	8701824
53	Alta humedad	301776	8712185
54	Alta humedad	299011	8715532
55	Alta humedad	184548	8764620
56	Alta humedad	490594	8586892
57	Alta humedad	280233	8700125
58	Alta humedad	418039	8608683
59	Alta humedad	421305	8693547
60	Alta humedad	220903	8734480
61	Alta humedad	370993	8693061
62	Alta humedad	421855	8616133
63	Alta humedad	480358	8609582
64	Alta humedad	364917	8639065
65	Alta humedad	464806	8595350
66	Alta humedad	254204	8756175
67	Alta humedad	421461	8649981
68	Alta humedad	416174	8557400
69	Alta humedad	480094	8552690
70	Alta humedad	362435	8663762
71	Alta humedad	389266	8572384
72	Alta humedad	434195	8578773
73	Alta humedad	399540	8614823
74	Alta humedad	285594	8722074
75	Alta humedad	523208	8596343
76	Alta humedad	383219	8557394
77	Alta humedad	521742	8607654
78	Alta humedad	171309	8756246
79	Alta humedad	393376	8567364
80	Alta humedad	360210	8539280
81	Alta humedad	358316	8696394
82	Alta humedad	517551	8639599
83	Alta humedad	465832	8623108
84	Alta humedad	365794	8634195
85	Alta humedad	446297	8577931
86	Alta humedad	387264	8668149

87	Alta humedad	508706	8631146
88	Alta humedad	295879	8738163
89	Alta humedad	413252	8564480
90	Alta humedad	275420	8699617
91	Alta humedad	487006	8591696
92	Alta humedad	371964	8627697
93	Alta humedad	367198	8660173
94	Alta humedad	495703	8555997
95	Alta humedad	457758	8601071
96	Alta humedad	370765	8537877
97	Alta humedad	259119	8708464
98	Alta humedad	410677	8564079
99	Alta humedad	375740	8686631
100	Alta humedad	390539	8646772
101	Alta humedad	441004	8667019
102	Alta humedad	469129	8658353
103	Alta humedad	330494	8711522
104	Alta humedad	427433	8660024
105	Alta humedad	491649	8552472
106	Alta humedad	474952	8562127
107	Alta humedad	423982	8573519
108	Alta humedad	264520	8702287
109	Alta humedad	364956	8565543
110	Alta humedad	409857	8563699
111	Alta humedad	359659	8671150
112	Alta humedad	433155	8621429
113	Alta humedad	345600	8718881
114	Alta humedad	473702	8544837
115	Alta humedad	288750	8747275
116	Alta humedad	355899	8656455
117	Alta humedad	412079	8555930
118	Alta humedad	488835	8658116
119	Alta humedad	424539	8684442
120	Alta humedad	448167	8550685
121	Alta humedad	389839	8567781
122	Alta humedad	197619	8761263
123	Alta humedad	178136	8743250
124	Alta humedad	502601	8613067
125	Alta humedad	293504	8737874
126	Alta humedad	190569	8767607
127	Alta humedad	157445	8752169
128	Alta humedad	354207	8719635
129	Alta humedad	300836	8706059
130	Alta humedad	464444	8629284
131	Alta humedad	521089	8603852

132	Alta humedad	453857	8579740
133	Alta humedad	212163	8764862
134	Alta humedad	472439	8579052
135	Alta humedad	471558	8665131
136	Alta humedad	486890	8583413
137	Alta humedad	335846	8681693
138	Alta humedad	465163	8576185
139	Alta humedad	382865	8642870
140	Alta humedad	528757	8622694
141	Alta humedad	441916	8539751
142	Alta humedad	302070	8688513
143	Alta humedad	472455	8647346
144	Alta humedad	408029	8573591
145	Alta humedad	281330	8702554
146	Alta humedad	514517	8578532
147	Alta humedad	403464	8552802
148	Alta humedad	468620	8657456
149	Alta humedad	519649	8649794
150	Alta humedad	150203	8745146
151	Alta humedad	466612	8671461
152	Alta humedad	431750	8674938
153	Alta humedad	206692	8766885
154	Alta humedad	531472	8624540
155	Alta humedad	284091	8730272
156	Alta humedad	445327	8610110
157	Alta humedad	464169	8573688
158	Alta humedad	399701	8536418
159	Alta humedad	474271	8546828
160	Alta humedad	150869	8746491
161	Alta humedad	422253	8530554
162	Alta humedad	468533	8635105
163	Alta humedad	465572	8635071
164	Alta humedad	511449	8561479
165	Alta humedad	453716	8669970
166	Alta humedad	404152	8648516
167	Alta humedad	357302	8563874
168	Alta humedad	434810	8657596
169	Alta humedad	389178	8700702
170	Alta humedad	152397	8750424
171	Alta humedad	396061	8598515
172	Alta humedad	392037	8558186
173	Alta humedad	438720	8662081
174	Alta humedad	488393	8656043
175	Alta humedad	302974	8726793
176	Alta humedad	502043	8564128

177	Alta humedad	371828	8577446
178	Alta humedad	438121	8625922
179	Alta humedad	462254	8613730
180	Alta humedad	322297	8718781
181	Alta humedad	433310	8535439
182	Alta humedad	312379	8678993
183	Alta humedad	458912	8644486
184	Alta humedad	223602	8730762
185	Alta humedad	237722	8754151
186	Alta humedad	160007	8746165
187	Alta humedad	490255	8623707
188	Alta humedad	269333	8723260
189	Alta humedad	386454	8597538
190	Alta humedad	452225	8601446
191	Alta humedad	396693	8655102
192	Alta humedad	461758	8628998
193	Alta humedad	352746	8656538
194	Alta humedad	490351	8616968
195	Alta humedad	447850	8598684
196	Alta humedad	319731	8702111
197	Alta humedad	513999	8633547
198	Alta humedad	342564	8680170
199	Alta humedad	364368	8577623
200	Alta humedad	397370	8680242
201	Alta humedad	282035	8714967
202	Alta humedad	302763	8731932
203	Alta humedad	372997	8543068
204	Alta humedad	424798	8656906
205	Alta humedad	267880	8731083
206	Alta humedad	447493	8615515
207	Alta humedad	432317	8579235
208	Alta humedad	403591	8646039
209	Alta humedad	400999	8565832
210	Alta humedad	280869	8708890
211	Alta humedad	295339	8686928
212	Alta humedad	431336	8632976
213	Alta humedad	400485	8557510
214	Alta humedad	378506	8540608
215	Alta humedad	372287	8688074
216	Alta humedad	154333	8764114
217	Alta humedad	439433	8690355
218	Alta humedad	315396	8704350
219	Alta humedad	382941	8680041
220	Alta humedad	454348	8655419
221	Alta humedad	401830	8577413

222	Alta humedad	330413	8674800
223	Alta humedad	393438	8576309
224	Alta humedad	361873	8706121
225	Alta humedad	449094	8541261
226	Alta humedad	392600	8682311
227	Alta humedad	459841	8652868
228	Alta humedad	229926	8751487
229	Alta humedad	285785	8732957
230	Alta humedad	450899	8646632
231	Alta humedad	509723	8587378
232	Alta humedad	368967	8574843
233	Alta humedad	349780	8700202
234	Alta humedad	374810	8558415
235	Alta humedad	357965	8679157
236	Alta humedad	284743	8707991
237	Alta humedad	380576	8697754
238	Alta humedad	345221	8708557
239	Alta humedad	488447	8618104
240	Alta humedad	456869	8632165
241	Alta humedad	518036	8633353
242	Alta humedad	319152	8694860
243	Alta humedad	426273	8619075
244	Alta humedad	344079	8671533
245	Alta humedad	161435	8740401
246	Alta humedad	329423	8720377
247	Alta humedad	369833	8580409
248	Alta humedad	471537	8551868
249	Alta humedad	457183	8658811
250	Alta humedad	422927	8566242
251	Alta humedad	398458	8575650
252	Alta humedad	390252	8571221
253	Alta humedad	452783	8593189
254	Alta humedad	360210	8649999
255	Alta humedad	435818	8638406
256	Alta humedad	447786	8600793
257	Alta humedad	463800	8634211
258	Alta humedad	337845	8700518
259	Alta humedad	509259	8669835
260	Alta humedad	257598	8726238
261	Alta humedad	375646	8571450
262	Alta humedad	281099	8685544
263	Alta humedad	473631	8560007
264	Alta humedad	371505	8627312
265	Alta humedad	351214	8697251
266	Alta humedad	358294	8666352

267	Alta humedad	373192	8684184
268	Alta humedad	373081	8573467
269	Alta humedad	311310	8702490
270	Alta humedad	268537	8742610
271	Alta humedad	340133	8721067
272	Alta humedad	406749	8575400
273	Alta humedad	361548	8562071
274	Alta humedad	347591	8681994
275	Alta humedad	386543	8619429
276	Alta humedad	336085	8701479
277	Alta humedad	411758	8673403
278	Alta humedad	267215	8712840
279	Alta humedad	476268	8623791
280	Alta humedad	453149	8665406
281	Alta humedad	510092	8658020
282	Alta humedad	383706	8696936
283	Alta humedad	416219	8603916
284	Alta humedad	400393	8642297
285	Alta humedad	306815	8740291
286	Alta humedad	298161	8734006
287	Alta humedad	520364	8626931
288	Alta humedad	395177	8572818
289	Alta humedad	402417	8540830
290	Alta humedad	385756	8613825
291	Alta humedad	513945	8593246
292	Alta humedad	419330	8660235
293	Alta humedad	451898	8630638
294	Alta humedad	471260	8606123
295	Alta humedad	421906	8638751
296	Alta humedad	243521	8738640
297	Alta humedad	328306	8665906
298	Alta humedad	416740	8694047
299	Alta humedad	268264	8727220
300	Alta humedad	381953	8655059
301	Alta humedad	365248	8639294
302	Alta humedad	368756	8694378
303	Alta humedad	445901	8599591
304	Alta humedad	488109	8562549
305	Alta humedad	454979	8539458
306	Alta humedad	262772	8731541
307	Alta humedad	213800	8751958
308	Alta humedad	446533	8588907
309	Alta humedad	427195	8618592
310	Alta humedad	516273	8650182
311	Alta humedad	316051	8715801

312	Alta humedad	476599	8611290
313	Alta humedad	260780	8704779
314	Alta humedad	428391	8584162
315	Alta humedad	509202	8595466
316	Alta humedad	473117	8627662
317	Alta humedad	403334	8695365
318	Alta humedad	419892	8577479
319	Alta humedad	333565	8730851
320	Alta humedad	382784	8592099
321	Alta humedad	365498	8587558
322	Alta humedad	500804	8651690
323	Alta humedad	432482	8680128
324	Alta humedad	448076	8603050
325	Alta humedad	408181	8614498
326	Alta humedad	328265	8668035
327	Alta humedad	487367	8676515
328	Alta humedad	452979	8657090
329	Alta humedad	510412	8574582
330	Alta humedad	315393	8675826
331	Alta humedad	387875	8616542
332	Alta humedad	370626	8653412
333	Alta humedad	403327	8529216
334	Alta humedad	474948	8569390
335	Alta humedad	531341	8616735
336	Alta humedad	370864	8697967
337	Alta humedad	443499	8583123
338	Alta humedad	428046	8687161
339	Alta humedad	380357	8709295
340	Alta humedad	400914	8581776
341	Alta humedad	473952	8593306
342	Alta humedad	399634	8568685
343	Alta humedad	230955	8749421
344	Alta humedad	453731	8562269
345	Alta humedad	444574	8686592
346	Alta humedad	233460	8756265
347	Alta humedad	425876	8581794
348	Alta humedad	383515	8581084
349	Alta humedad	222833	8754012
350	Alta humedad	441332	8566614
351	Alta humedad	453839	8570890
352	Alta humedad	329298	8708872
353	Alta humedad	423412	8588682
354	Alta humedad	469334	8550199
355	Alta humedad	412969	8681424
356	Alta humedad	430412	8638587

357	Alta humedad	277782	8753464
358	Alta humedad	446418	8541426
359	Alta humedad	359122	8541985
360	Alta humedad	408552	8573288
361	Alta humedad	372961	8578228
362	Alta humedad	428797	8655505
363	Alta humedad	332686	8715651
364	Alta humedad	440849	8621081
365	Alta humedad	377919	8709520
366	Alta humedad	378228	8591278
367	Alta humedad	158212	8748086
368	Alta humedad	377087	8637413
369	Alta humedad	497794	8668113
370	Alta humedad	416617	8540156
371	Alta humedad	364956	8688070
372	Alta humedad	380434	8670760
373	Alta humedad	386344	8625942
374	Alta humedad	527062	8630202
375	Alta humedad	338108	8676601
376	Alta humedad	465753	8570475
377	Alta humedad	266378	8754793
378	Alta humedad	211079	8751646
379	Alta humedad	514113	8616803
380	Alta humedad	410932	8566441
381	Alta humedad	365492	8668844
382	Alta humedad	459826	8592693
383	Alta humedad	447748	8651214
384	Alta humedad	468443	8599674
385	Alta humedad	356332	8720519
386	Alta humedad	481898	8672721
387	Alta humedad	347080	8691153
388	Alta humedad	324296	8731528
389	Alta humedad	469140	8581767
390	Alta humedad	397863	8584370
391	Alta humedad	383670	8647125
392	Alta humedad	262896	8719125
393	Alta humedad	262475	8754272
394	Alta humedad	510037	8605315
395	Alta humedad	385713	8705629
396	Alta humedad	500912	8591008
397	Alta humedad	380244	8672568
398	Alta humedad	452278	8539704
399	Alta humedad	362331	8567522
400	Alta humedad	412607	8565001
401	Alta humedad	503003	8570928

402	Alta humedad	362835	8649453
403	Alta humedad	455756	8639694
404	Alta humedad	392281	8584306
405	Alta humedad	232479	8758104
406	Alta humedad	300455	8677992
407	Alta humedad	364648	8670563
408	Alta humedad	455163	8609575
409	Alta humedad	325461	8713188
410	Alta humedad	295073	8746611
411	Alta humedad	421011	8630429
412	Alta humedad	470885	8638691
413	Alta humedad	393769	8557144
414	Alta humedad	309344	8729562
415	Alta humedad	274622	8732116
416	Alta humedad	355131	8678798
417	Alta humedad	418800	8574244
418	Alta humedad	326393	8724678
419	Alta humedad	473575	8606619
420	Alta humedad	415942	8644248
421	Alta humedad	491710	8573479
422	Alta humedad	396641	8589539
423	Alta humedad	485593	8557148
424	Alta humedad	343482	8702095
425	Alta humedad	243365	8745086
426	Alta humedad	365389	8538282
427	Alta humedad	482783	8564149
428	Alta humedad	171798	8772926
429	Alta humedad	480132	8601372
430	Alta humedad	474437	8616055
431	Alta humedad	509382	8606610
432	Alta humedad	164635	8763005
433	Alta humedad	496227	8571988
434	Alta humedad	243534	8720890
435	Alta humedad	398842	8650370
436	Alta humedad	490036	8662551
437	Alta humedad	384549	8588037
438	Alta humedad	234665	8756013
439	Alta humedad	372826	8559346
440	Alta humedad	189947	8774896
441	Alta humedad	512600	8613331
442	Alta humedad	380728	8688767
443	Alta humedad	359734	8715386
444	Alta humedad	381473	8556899
445	Alta humedad	424135	8557355
446	Alta humedad	353857	8733865

447	Alta humedad	476838	8628186
448	Alta humedad	416556	8659149
449	Alta humedad	491473	8564785
450	Alta humedad	420081	8613900
451	Alta humedad	361670	8696742
452	Alta humedad	412573	8610399
453	Alta humedad	302438	8682677
454	Alta humedad	324713	8685763
455	Alta humedad	230406	8739516
456	Alta humedad	484480	8593094
457	Alta humedad	201940	8763910
458	Alta humedad	350424	8670416
459	Alta humedad	395834	8668632
460	Alta humedad	259656	8726964
461	Alta humedad	408630	8557552
462	Alta humedad	410742	8609478
463	Alta humedad	392425	8576983
464	Alta humedad	411572	8670459
465	Alta humedad	413564	8669828
466	Alta humedad	367777	8658588
467	Alta humedad	467162	8604651
468	Alta humedad	289187	8714350
469	Alta humedad	461514	8617082
470	Alta humedad	472035	8663525
471	Alta humedad	415588	8671111
472	Alta humedad	492847	8678512
473	Alta humedad	376808	8583326
474	Alta humedad	421528	8606760
475	Alta humedad	442120	8604078
476	Alta humedad	361468	8691915
477	Alta humedad	468647	8652625
478	Alta humedad	525318	8618336
479	Alta humedad	368901	8713317
480	Alta humedad	353972	8552554
481	Alta humedad	428452	8531722
482	Alta humedad	442084	8553181
483	Alta humedad	346984	8689949
484	Alta humedad	386736	8613788
485	Alta humedad	179979	8770543
486	Alta humedad	248003	8734806
487	Alta humedad	294690	8716906
488	Alta humedad	385532	8557653
489	Alta humedad	369073	8552860
490	Alta humedad	293545	8711270
491	Alta humedad	402434	8669521

492	Alta humedad	427267	8544580
493	Alta humedad	219884	8733814
494	Alta humedad	364513	8662085
495	Alta humedad	424792	8638903
496	Alta humedad	230643	8748241
497	Alta humedad	338135	8709187
498	Alta humedad	462609	8587624
499	Alta humedad	321957	8704130
500	Alta humedad	379071	8547603

Anexo 4. Puntos de muestreo distribuidos al azar por clases en el área de estudio para VHI.

N.º	Categoría	Este	Norte
1	Sequía extrema	424978	8600250
2	Sequía extrema	498020	8650337
3	Sequía extrema	430956	8638169
4	Sequía extrema	354438	8567633
5	Sequía extrema	483947	8589816
6	Sequía extrema	275137	8751040
7	Sequía extrema	230857	8766495
8	Sequía extrema	522333	8599842
9	Sequía extrema	499987	8677989
10	Sequía extrema	409983	8598487
11	Sequía extrema	444506	8609289
12	Sequía extrema	259627	8733520
13	Sequía extrema	353998	8657109
14	Sequía extrema	347419	8728353
15	Sequía extrema	491200	8607121
16	Sequía extrema	365902	8660304
17	Sequía extrema	471317	8599313
18	Sequía extrema	397171	8571980
19	Sequía extrema	489983	8652674
20	Sequía extrema	337356	8691227
21	Sequía extrema	363809	8627133
22	Sequía extrema	408741	8567346
23	Sequía extrema	457846	8589557
24	Sequía extrema	436539	8617217
25	Sequía extrema	521806	8632671
26	Sequía extrema	456222	8666913
27	Sequía extrema	315859	8729583
28	Sequía extrema	464831	8606421
29	Sequía extrema	414485	8598803
30	Sequía extrema	321500	8696254
31	Sequía extrema	460466	8592374
32	Sequía extrema	482890	8640530
33	Sequía extrema	419721	8583420
34	Sequía extrema	385097	8574049
35	Sequía extrema	437361	8595022
36	Sequía extrema	464164	8666374
37	Sequía extrema	525161	8622215
38	Sequía extrema	418658	8669957
39	Sequía extrema	462093	8559354
40	Sequía extrema	381880	8560167
41	Sequía extrema	396518	8690782

42	Sequía extrema	264737	8741623
43	Sequía extrema	262556	8731345
44	Sequía extrema	478517	8606889
45	Sequía extrema	501418	8623467
46	Sequía extrema	390681	8577057
47	Sequía extrema	474018	8628304
48	Sequía extrema	493558	8555252
49	Sequía extrema	488887	8595399
50	Sequía extrema	216148	8758116
51	Sequía extrema	310279	8719374
52	Sequía extrema	430428	8554543
53	Sequía extrema	422442	8637912
54	Sequía extrema	286678	8717982
55	Sequía extrema	443829	8609066
56	Sequía extrema	405990	8583267
57	Sequía severa	284302	8709400
58	Sequía severa	308100	8697545
59	Sequía severa	392064	8629118
60	Sequía severa	346806	8669725
61	Sequía severa	359824	8720781
62	Sequía severa	206945	8746324
63	Sequía severa	343471	8671741
64	Sequía severa	467871	8639470
65	Sequía severa	518027	8628414
66	Sequía severa	494061	8631692
67	Sequía severa	380936	8542149
68	Sequía severa	425130	8543518
69	Sequía severa	468527	8635815
70	Sequía severa	492513	8619365
71	Sequía severa	394264	8584493
72	Sequía severa	261423	8724648
73	Sequía severa	458121	8613749
74	Sequía severa	402167	8548821
75	Sequía severa	365254	8635882
76	Sequía severa	445194	8606664
77	Sequía severa	441090	8588136
78	Sequía severa	435551	8535061
79	Sequía severa	236934	8754940
80	Sequía severa	482452	8617142
81	Sequía severa	497265	8581611
82	Sequía severa	289146	8681850
83	Sequía severa	386578	8577477
84	Sequía severa	319286	8717504
85	Sequía severa	455779	8661224
86	Sequía severa	462650	8601256

87	Sequía severa	504210	8665072
88	Sequía severa	513346	8628797
89	Sequía severa	459305	8557182
90	Sequía severa	488811	8675611
91	Sequía severa	452924	8611079
92	Sequía severa	406037	8566249
93	Sequía severa	483621	8614370
94	Sequía severa	204663	8745027
95	Sequía severa	273900	8701747
96	Sequía severa	418437	8584418
97	Sequía severa	502871	8635796
98	Sequía severa	396185	8564070
99	Sequía severa	389263	8691522
100	Sequía severa	269757	8753478
101	Sequía severa	502456	8672592
102	Sequía severa	277423	8706927
103	Sequía severa	380436	8709777
104	Sequía severa	466368	8603826
105	Sequía severa	470285	8603269
106	Sequía severa	472580	8598773
107	Sequía severa	393693	8593879
108	Sequía severa	459765	8614088
109	Sequía severa	487205	8562319
110	Sequía severa	294391	8687764
111	Sequía severa	443218	8668420
112	Sequía severa	518379	8652885
113	Sequía moderada	455019	8633329
114	Sequía moderada	444402	8605624
115	Sequía moderada	357900	8666397
116	Sequía moderada	494519	8623852
117	Sequía moderada	457306	8592554
118	Sequía moderada	491106	8652011
119	Sequía moderada	376217	8568231
120	Sequía moderada	235874	8762107
121	Sequía moderada	436285	8535488
122	Sequía moderada	462960	8665916
123	Sequía moderada	482655	8615602
124	Sequía moderada	499859	8617554
125	Sequía moderada	448501	8584135
126	Sequía moderada	444093	8605814
127	Sequía moderada	353353	8723148
128	Sequía moderada	455148	8648339
129	Sequía moderada	441602	8599159
130	Sequía moderada	468562	8544086
131	Sequía moderada	474170	8614988

132	Sequía moderada	363927	8686581
133	Sequía moderada	333674	8691320
134	Sequía moderada	386111	8572214
135	Sequía moderada	468107	8625182
136	Sequía moderada	464780	8681926
137	Sequía moderada	394763	8575427
138	Sequía moderada	397503	8617554
139	Sequía moderada	319551	8699032
140	Sequía moderada	398723	8571371
141	Sequía moderada	419718	8595138
142	Sequía moderada	241143	8753911
143	Sequía moderada	493503	8585773
144	Sequía moderada	425740	8590137
145	Sequía moderada	309139	8679864
146	Sequía moderada	357128	8659253
147	Sequía moderada	397941	8579326
148	Sequía moderada	344259	8716367
149	Sequía moderada	435756	8616126
150	Sequía moderada	367384	8690302
151	Sequía moderada	392038	8577593
152	Sequía moderada	340313	8669282
153	Sequía moderada	366050	8572973
154	Sequía moderada	398027	8595064
155	Sequía moderada	467128	8563270
156	Sequía moderada	490673	8593351
157	Sequía moderada	457388	8621777
158	Sequía moderada	465490	8594124
159	Sequía moderada	493637	8579857
160	Sequía moderada	381430	8637944
161	Sequía moderada	280948	8741796
162	Sequía moderada	411905	8593615
163	Sequía moderada	428013	8658403
164	Sequía moderada	508537	8611762
165	Sequía moderada	227090	8743311
166	Sequía moderada	367636	8720145
167	Sequía moderada	369259	8634229
168	Sequía moderada	212883	8751728
169	Sequía ligera	341264	8698039
170	Sequía ligera	476849	8669416
171	Sequía ligera	500095	8578317
172	Sequía ligera	474056	8610303
173	Sequía ligera	390993	8576329
174	Sequía ligera	410252	8599296
175	Sequía ligera	473694	8620503
176	Sequía ligera	457570	8577373

177	Sequía ligera	464858	8683085
178	Sequía ligera	479683	8629162
179	Sequía ligera	390287	8574842
180	Sequía ligera	419546	8658883
181	Sequía ligera	465119	8612076
182	Sequía ligera	391183	8587296
183	Sequía ligera	422054	8624595
184	Sequía ligera	457392	8588398
185	Sequía ligera	495860	8590417
186	Sequía ligera	503264	8573783
187	Sequía ligera	352626	8658304
188	Sequía ligera	453590	8609174
189	Sequía ligera	487471	8629724
190	Sequía ligera	467180	8626618
191	Sequía ligera	367454	8636645
192	Sequía ligera	366330	8653029
193	Sequía ligera	364937	8721008
194	Sequía ligera	300831	8679407
195	Sequía ligera	277833	8718406
196	Sequía ligera	420213	8641477
197	Sequía ligera	416707	8646467
198	Sequía ligera	491013	8608529
199	Sequía ligera	267314	8722832
200	Sequía ligera	484879	8655192
201	Sequía ligera	244313	8734867
202	Sequía ligera	525187	8624250
203	Sequía ligera	425180	8532079
204	Sequía ligera	386818	8565791
205	Sequía ligera	313141	8702754
206	Sequía ligera	409195	8596982
207	Sequía ligera	373249	8589499
208	Sequía ligera	512485	8631655
209	Sequía ligera	220142	8753499
210	Sequía ligera	376383	8594641
211	Sequía ligera	473092	8617024
212	Sequía ligera	323044	8711687
213	Sequía ligera	423444	8556579
214	Sequía ligera	489129	8609906
215	Sequía ligera	466299	8611555
216	Sequía ligera	508523	8605401
217	Sequía ligera	332105	8732671
218	Sequía ligera	375504	8660893
219	Sequía ligera	461998	8608714
220	Sequía ligera	371679	8711817
221	Sequía ligera	374898	8580041

222	Sequía ligera	272492	8697855
223	Sequía ligera	527146	8603939
224	Sequía ligera	380979	8643080
225	Estrés / Normal	521221	8631271
226	Estrés / Normal	484965	8648361
227	Estrés / Normal	428342	8591452
228	Estrés / Normal	393733	8583508
229	Estrés / Normal	217769	8756597
230	Estrés / Normal	411467	8562867
231	Estrés / Normal	389504	8581010
232	Estrés / Normal	446394	8544883
233	Estrés / Normal	317957	8726659
234	Estrés / Normal	488418	8669815
235	Estrés / Normal	388926	8571243
236	Estrés / Normal	469852	8668677
237	Estrés / Normal	346419	8719394
238	Estrés / Normal	239211	8735549
239	Estrés / Normal	475763	8678686
240	Estrés / Normal	394333	8554123
241	Estrés / Normal	433380	8592330
242	Estrés / Normal	505571	8611847
243	Estrés / Normal	377678	8571940
244	Estrés / Normal	452537	8647646
245	Estrés / Normal	285328	8686627
246	Estrés / Normal	412466	8581214
247	Estrés / Normal	287510	8741022
248	Estrés / Normal	280577	8691754
249	Estrés / Normal	397712	8561024
250	Estrés / Normal	385049	8623882
251	Estrés / Normal	488679	8658730
252	Estrés / Normal	436687	8605168
253	Estrés / Normal	226838	8770612
254	Estrés / Normal	413110	8636378
255	Estrés / Normal	338201	8723532
256	Estrés / Normal	235051	8766521
257	Estrés / Normal	486629	8638501
258	Estrés / Normal	498170	8628558
259	Estrés / Normal	380651	8573132
260	Estrés / Normal	477352	8669878
261	Estrés / Normal	285747	8718566
262	Estrés / Normal	456130	8670101
263	Estrés / Normal	474830	8579488
264	Estrés / Normal	436127	8588548
265	Estrés / Normal	515222	8630931
266	Estrés / Normal	413763	8586681

267	Estrés / Normal	311919	8675485
268	Estrés / Normal	459873	8616508
269	Estrés / Normal	487846	8610728
270	Estrés / Normal	402213	8581235
271	Estrés / Normal	407406	8578721
272	Estrés / Normal	219358	8749098
273	Estrés / Normal	439491	8587791
274	Estrés / Normal	464814	8609159
275	Estrés / Normal	431747	8611946
276	Estrés / Normal	447770	8611815
277	Estrés / Normal	457347	8606609
278	Estrés / Normal	498257	8591289
279	Estrés / Normal	301078	8729378
280	Estrés / Normal	345385	8710178
281	Normal a saludable	495855	8636353
282	Normal a saludable	449651	8560081
283	Normal a saludable	455172	8541960
284	Normal a saludable	392936	8575290
285	Normal a saludable	389599	8631239
286	Normal a saludable	472801	8680759
287	Normal a saludable	306091	8721326
288	Normal a saludable	388418	8606117
289	Normal a saludable	483567	8557996
290	Normal a saludable	372339	8669129
291	Normal a saludable	406667	8599329
292	Normal a saludable	422853	8582850
293	Normal a saludable	257468	8704857
294	Normal a saludable	412652	8607508
295	Normal a saludable	475800	8647610
296	Normal a saludable	209308	8769078
297	Normal a saludable	280900	8741757
298	Normal a saludable	463199	8603131
299	Normal a saludable	383666	8576613
300	Normal a saludable	366847	8589106
301	Normal a saludable	206428	8745386
302	Normal a saludable	394464	8583416
303	Normal a saludable	292684	8749643
304	Normal a saludable	378313	8697473
305	Normal a saludable	476749	8595015
306	Normal a saludable	454113	8575008
307	Normal a saludable	469287	8637789
308	Normal a saludable	502086	8634139
309	Normal a saludable	507385	8614558
310	Normal a saludable	503807	8564240
311	Normal a saludable	417339	8555380

312	Normal a saludable	431910	8640834
313	Normal a saludable	470246	8671077
314	Normal a saludable	472936	8555901
315	Normal a saludable	387891	8574881
316	Normal a saludable	350478	8687297
317	Normal a saludable	392929	8601377
318	Normal a saludable	402638	8575743
319	Normal a saludable	439080	8595430
320	Normal a saludable	386270	8566714
321	Normal a saludable	451411	8620096
322	Normal a saludable	456233	8601330
323	Normal a saludable	489197	8588292
324	Normal a saludable	384345	8570169
325	Normal a saludable	502014	8617672
326	Normal a saludable	309169	8683931
327	Normal a saludable	427484	8594482
328	Normal a saludable	512524	8604118
329	Normal a saludable	390761	8591104
330	Normal a saludable	464516	8613285
331	Normal a saludable	218170	8758296
332	Normal a saludable	435981	8574000
333	Normal a saludable	369811	8654579
334	Normal a saludable	449516	8636777
335	Normal a saludable	448490	8593702
336	Saludable	262207	8700884
337	Saludable	259479	8729537
338	Saludable	407275	8598481
339	Saludable	420442	8590676
340	Saludable	478435	8638332
341	Saludable	303808	8684508
342	Saludable	487977	8608921
343	Saludable	492590	8618802
344	Saludable	519799	8599521
345	Saludable	507682	8613670
346	Saludable	394463	8554219
347	Saludable	363920	8584677
348	Saludable	479899	8549010
349	Saludable	382559	8636334
350	Saludable	441394	8671549
351	Saludable	445314	8565334
352	Saludable	288494	8741982
353	Saludable	479486	8630875
354	Saludable	461851	8598805
355	Saludable	386845	8643580
356	Saludable	243742	8724905

357	Saludable	381501	8536837
358	Saludable	435310	8537198
359	Saludable	391763	8574342
360	Saludable	293115	8726538
361	Saludable	496372	8640121
362	Saludable	287191	8691479
363	Saludable	407543	8636530
364	Saludable	339521	8708020
365	Saludable	281273	8729710
366	Saludable	386595	8534257
367	Saludable	505164	8660798
368	Saludable	392206	8575156
369	Saludable	463513	8681998
370	Saludable	448965	8575024
371	Saludable	384284	8693340
372	Saludable	498398	8616599
373	Saludable	457537	8567209
374	Saludable	445305	8618428
375	Saludable	218004	8767688
376	Saludable	436026	8561532
377	Saludable	281555	8754333
378	Saludable	421360	8614872
379	Saludable	425748	8544938
380	Saludable	461031	8613424
381	Saludable	499045	8633615
382	Saludable	380467	8582991
383	Saludable	492532	8599911
384	Saludable	449208	8611844
385	Saludable	375292	8648567
386	Saludable	471720	8588481
387	Saludable	405118	8588975
388	Saludable	472119	8635625
389	Saludable	394180	8572697
390	Saludable	433381	8634905
391	Muy saludable	404287	8572134
392	Muy saludable	441326	8652491
393	Muy saludable	473400	8544753
394	Muy saludable	393236	8647815
395	Muy saludable	273013	8747533
396	Muy saludable	248815	8730290
397	Muy saludable	508167	8602549
398	Muy saludable	472844	8667970
399	Muy saludable	484351	8625394
400	Muy saludable	474477	8602936
401	Muy saludable	403218	8632817

402	Muy saludable	407254	8648572
403	Muy saludable	483756	8661308
404	Muy saludable	475335	8628959
405	Muy saludable	434747	8539425
406	Muy saludable	501197	8646331
407	Muy saludable	388886	8532014
408	Muy saludable	469526	8670063
409	Muy saludable	507328	8615117
410	Muy saludable	507543	8578851
411	Muy saludable	408006	8577678
412	Muy saludable	495869	8636929
413	Muy saludable	385620	8596553
414	Muy saludable	391060	8580367
415	Muy saludable	391618	8632558
416	Muy saludable	446785	8642834
417	Muy saludable	484098	8622179
418	Muy saludable	394319	8700624
419	Muy saludable	326832	8672333
420	Muy saludable	277172	8692170
421	Muy saludable	257096	8718737
422	Muy saludable	398667	8581668
423	Muy saludable	388256	8559951
424	Muy saludable	299539	8694780
425	Muy saludable	386275	8570948
426	Muy saludable	370850	8694559
427	Muy saludable	287398	8692317
428	Muy saludable	489736	8649149
429	Muy saludable	239309	8754860
430	Muy saludable	262968	8740777
431	Muy saludable	475727	8676935
432	Muy saludable	447777	8626043
433	Muy saludable	483996	8598704
434	Muy saludable	364288	8664634
435	Muy saludable	480642	8631550
436	Muy saludable	472219	8620368
437	Muy saludable	247712	8733303
438	Muy saludable	502049	8633950
439	Muy saludable	477806	8684509
440	Muy saludable	415838	8602088
441	Muy saludable	479802	8577740
442	Muy saludable	455711	8544363
443	Muy saludable	433491	8600596
444	Muy saludable	278641	8721004
445	Muy saludable	280781	8737963
446	Excelente salud	484446	8663968

447	Excelente salud	405357	8590888
448	Excelente salud	387861	8605079
449	Excelente salud	360579	8684124
450	Excelente salud	389852	8592137
451	Excelente salud	420158	8610635
452	Excelente salud	436684	8632637
453	Excelente salud	227101	8741666
454	Excelente salud	468263	8602938
455	Excelente salud	413507	8594769
456	Excelente salud	397412	8579292
457	Excelente salud	421609	8554276
458	Excelente salud	473574	8636814
459	Excelente salud	366557	8676580
460	Excelente salud	270793	8703664
461	Excelente salud	504162	8588898
462	Excelente salud	355476	8648438
463	Excelente salud	376583	8575060
464	Excelente salud	365623	8684619
465	Excelente salud	391250	8587148
466	Excelente salud	390557	8617537
467	Excelente salud	317538	8696260
468	Excelente salud	483116	8647815
469	Excelente salud	510549	8631931
470	Excelente salud	397968	8592585
471	Excelente salud	460233	8605283
472	Excelente salud	232036	8727530
473	Excelente salud	290952	8715971
474	Excelente salud	462758	8616448
475	Excelente salud	487633	8618173
476	Excelente salud	439484	8567976
477	Excelente salud	403258	8587318
478	Excelente salud	399824	8568933
479	Excelente salud	339622	8724303
480	Excelente salud	465350	8668244
481	Excelente salud	500541	8657147
482	Excelente salud	418577	8590389
483	Excelente salud	414548	8551122
484	Excelente salud	525340	8595832
485	Excelente salud	449914	8607456
486	Excelente salud	496236	8629164
487	Excelente salud	408021	8597695
488	Excelente salud	505774	8621169
489	Excelente salud	432725	8646928
490	Excelente salud	475641	8624685
491	Excelente salud	391447	8566371

492	Excelente salud	474444	8632679
493	Excelente salud	207336	8756842
494	Excelente salud	360484	8731763
495	Excelente salud	386063	8574440
496	Excelente salud	442919	8604712
497	Excelente salud	402980	8591782
498	Excelente salud	357569	8578299
499	Excelente salud	468912	8591480
500	Excelente salud	415178	8651047

Anexo 5. Precisión del Índice de sequía de Diferencia Normalizada (NDDI).

Año	Precisión general	Coeficiente kappa	Precisión del usuario								Precisión del productor							
			Sequia extrema	Sequia severa	Sequia moderada	Sequia ligera	Normal /Transición	Humedad ligera	Humedad moderada	Alta humedad	Sequia extrema	Sequia severa	Sequia moderada	Sequia ligera	Normal /Transición	Humedad ligera	Humedad moderada	Alta humedad
2004	0,75	0,69	0,85	0,88	0,82	0,87	0,80	0,89	0,80	0,82	0,87	0,82	0,85	0,86	0,85	0,87	0,75	0,75
2005	0,76	0,72	0,87	0,89	0,84	0,88	0,82	0,90	0,83	0,84	0,88	0,84	0,87	0,87	0,87	0,89	0,78	0,77
2006	0,73	0,67	0,83	0,86	0,80	0,85	0,78	0,87	0,79	0,80	0,85	0,80	0,83	0,84	0,83	0,85	0,73	0,73
2007	0,76	0,70	0,86	0,88	0,83	0,88	0,81	0,90	0,81	0,83	0,87	0,83	0,86	0,87	0,86	0,88	0,76	0,76
2008	0,77	0,73	0,88	0,90	0,85	0,89	0,83	0,91	0,84	0,85	0,89	0,85	0,88	0,88	0,88	0,90	0,79	0,78
2009	0,75	0,70	0,85	0,87	0,82	0,87	0,79	0,88	0,80	0,82	0,86	0,82	0,85	0,86	0,84	0,87	0,74	0,74
2010	0,74	0,69	0,84	0,86	0,81	0,86	0,79	0,88	0,79	0,81	0,85	0,81	0,84	0,85	0,84	0,86	0,73	0,73
2011	0,77	0,72	0,87	0,89	0,84	0,89	0,82	0,91	0,83	0,84	0,88	0,84	0,87	0,88	0,87	0,89	0,78	0,77
2012	0,74	0,68	0,84	0,86	0,80	0,85	0,77	0,87	0,78	0,80	0,85	0,80	0,83	0,84	0,82	0,85	0,72	0,72
2013	0,78	0,73	0,88	0,91	0,86	0,90	0,84	0,92	0,85	0,86	0,90	0,86	0,89	0,89	0,89	0,91	0,80	0,79
2014	0,75	0,70	0,85	0,87	0,82	0,87	0,79	0,88	0,80	0,82	0,86	0,82	0,85	0,86	0,84	0,87	0,74	0,74
2015	0,76	0,71	0,86	0,89	0,83	0,88	0,81	0,89	0,82	0,83	0,87	0,83	0,86	0,87	0,86	0,88	0,77	0,76
2016	0,74	0,69	0,84	0,86	0,81	0,86	0,78	0,88	0,79	0,81	0,85	0,81	0,84	0,85	0,83	0,86	0,73	0,73
2017	0,77	0,73	0,88	0,90	0,85	0,89	0,83	0,91	0,84	0,85	0,89	0,85	0,88	0,88	0,88	0,90	0,79	0,78
2018	0,76	0,71	0,86	0,88	0,83	0,88	0,80	0,89	0,81	0,83	0,87	0,83	0,86	0,87	0,85	0,88	0,76	0,75
2019	0,77	0,72	0,87	0,89	0,84	0,89	0,82	0,90	0,83	0,84	0,88	0,84	0,87	0,88	0,87	0,89	0,78	0,77
2020	0,77	0,73	0,87	0,90	0,85	0,89	0,83	0,91	0,84	0,85	0,89	0,85	0,88	0,88	0,88	0,90	0,79	0,78
2021	0,76	0,71	0,86	0,88	0,83	0,88	0,81	0,90	0,82	0,83	0,87	0,84	0,87	0,87	0,86	0,89	0,77	0,76
2022	0,76	0,72	0,87	0,89	0,84	0,88	0,82	0,90	0,83	0,84	0,88	0,84	0,87	0,88	0,87	0,89	0,78	0,77
2023	0,77	0,73	0,87	0,90	0,85	0,89	0,83	0,91	0,84	0,85	0,89	0,85	0,88	0,88	0,88	0,90	0,79	0,78
2024	0,75	0,70	0,85	0,87	0,82	0,87	0,80	0,89	0,81	0,83	0,86	0,82	0,85	0,86	0,85	0,88	0,76	0,75

Anexo 6. Precisión del Índice de sequía multibanda normalizado (NMDI).

Año	Precisión general	Coeficiente kappa	Precisión del usuario						Precisión del productor						
			Sequía Severa	Sequía moderada	Sequía ligera	Normal a ligeramente húmedo	Humedad moderada	Alta humedad	Sequía Severa	Sequía moderada	Sequía ligera	Normal a ligeramente húmedo	Humedad moderada	Alta humedad	
2004	0,93	0,85						0,93							0,91
2005	0,93	0,86						0,94							0,92
2006	0,92	0,83						0,92							0,89
2007	0,93	0,86						0,93							0,92
2008	0,94	0,87						0,95							0,93
2009	0,93	0,85						0,93							0,91
2010	0,92	0,84						0,92							0,90
2011	0,93	0,86						0,94							0,92
2012	0,91	0,82						0,91							0,88
2013	0,94	0,88						0,96							0,94
2014	0,93	0,85						0,93							0,91
2015	0,93	0,86						0,93							0,92
2016	0,92	0,84						0,92							0,89
2017	0,94	0,87						0,95							0,93
2018	0,93	0,86						0,93							0,92
2019	0,93	0,87						0,94							0,92
2020	0,94	0,87						0,95							0,93
2021	0,93	0,86						0,93							0,92
2022	0,93	0,86						0,94							0,92
2023	0,93	0,87						0,94							0,92
2024	0,92	0,84						0,92							0,89

Anexo 7. Precisión del Índice de Salud de la Vegetación (VHI).

Año	precisión general	Coeficiente kappa	Precisión del usuario									Precisión del productor								
			Sequía extrema	Sequía severa	Sequía Moderada	Sequía ligera	Estrés / Normal	Normal a saludable	Saludable	Muy saludable	Excelente salud	Sequía extrema	Sequía severa	Sequía Moderada	Sequía ligera	Estrés / Normal	Normal a saludable	Saludable	Muy saludable	Excelente salud
2013	0,71	0,64	0,80	0,82	0,78	0,75	0,70	0,81	0,85		0,89	0,81	0,79	0,77	0,74	0,68	0,80	0,84		0,88
2014	0,71	0,65	0,81	0,83	0,79	0,76	0,71	0,82	0,86	0,88	0,90	0,82	0,80	0,78	0,75	0,69	0,81	0,85	0,87	0,89
2015	0,70	0,63	0,79	0,81	0,77	0,74	0,69	0,80			0,88	0,80	0,78	0,76	0,73	0,67	0,79			0,87
2016	0,70	0,64	0,80	0,82	0,78	0,75	0,70	0,81	0,85		0,89	0,81	0,79	0,77	0,74	0,68	0,80	0,84		0,88
2017	0,72	0,66	0,82	0,84	0,80	0,77	0,72	0,83			0,91	0,83	0,81	0,79	0,76	0,70	0,82			0,90
2018	0,71	0,65	0,81	0,83	0,79	0,76	0,71	0,82	0,86		0,90	0,82	0,80	0,78	0,75	0,69	0,81	0,85		0,89
2019	0,71	0,66	0,81	0,83	0,79	0,76	0,71	0,82			0,90	0,82	0,80	0,78	0,75	0,69	0,81			0,89
2020	0,72	0,67	0,82	0,84	0,80	0,77	0,72	0,83	0,87		0,91	0,83	0,81	0,79	0,76	0,70	0,82	0,86		0,90
2021	0,70	0,64	0,80	0,82	0,78	0,75	0,70	0,81	0,85	0,87	0,89	0,81	0,79	0,77	0,74	0,68	0,80	0,84	0,86	0,88
2022	0,71	0,65	0,81	0,83	0,79	0,76	0,71	0,82	0,86	0,88	0,90	0,82	0,80	0,78	0,75	0,69	0,81	0,85	0,87	0,89
2023	0,72	0,66	0,82	0,84	0,80	0,77	0,72	0,83	0,87		0,91	0,83	0,81	0,79	0,76	0,70	0,82	0,86		0,90
2024	0,70	0,64	0,80	0,82	0,78	0,75	0,70	0,81	0,85	0,87	0,89	0,81	0,79	0,77	0,74	0,68	0,80	0,84	0,86	0,88