

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE  
DIOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

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



**TESIS**

VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA VEGETACION EN CUATRO ZONAS  
IMPACTADAS POR LA MINERÍA AURÍFERA MEDIANTE EL EVI EN EL  
PERIODO 1985-2017

**TESIS PRESENTADO POR:**

Bachiller: GALLEGOS CHACON,  
Luis Eduardo

Bachiller: BARRIGA PAREDES,  
Víctor Álvaro Manuel

**Para optar el título profesional de  
ingeniero forestal y medio  
ambiente**

**Asesor:** Dr. Alarcón Aguirre, Gabriel

**Co-asesor:** Ing. Pillaca Ortiz, Jorge  
Martin

Puerto Maldonado, 2018.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE  
DIOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

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



**TESIS**

**VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA VEGETACION EN CUATRO ZONAS  
IMPACTADAS POR LA MINERÍA AURÍFERA MEDIANTE EL EVI EN EL  
PERIODO 1985-2017**

**TESIS PRESENTADO POR:**

Bachiller: GALLEGOS CHACON,  
Luis Eduardo

Bachiller: BARRIGA PAREDES,  
Víctor Álvaro Manuel

**Para optar el título profesional de  
ingeniero forestal y medio  
ambiente**

**Asesor:** Dr. Alarcón Aguirre, Gabriel

**Co-asesor:** Ing. Pillaca Ortiz, Jorge  
Martin

Puerto Maldonado, 2018

## **DEDICATORIA**

A nuestros Padres

Por su apoyo incondicional durante toda nuestra etapa académica, consejos y motivaciones constantes para alcanzar el objetivo.

A nuestros hermanos (as)

Por su apoyo y cariño incondicional.

A nuestras amistades

Que, durante la etapa universitaria compartimos momentos gratos y motivaron a seguir adelante y no rendirnos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, por la formación profesional que nos brindó.

A los Docentes de la Carrera Profesional de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente, por compartirnos sus conocimientos durante toda nuestra vida universitaria.

A nuestro Asesor Académico DR. Gabriel Alarcón Aguirre y Co- Asesor Ing. Jorge Martin Pillaca Ortiz, por orientarnos y apoyarnos en el desarrollo de la investigación.

A la empresa SALVACION S.R.L., Gerenciada por el Sr. Claudio Tapara Huallpa y su esposa la Sra. Patricia Quispe Vega, por confiar y apoyarnos en el proceso de la investigación.

Al Ingeniero Metalúrgico Guido Huaquisto, por brindarnos su tiempo y apoyarnos en proceso de validación en campo.

Al Centro de Teledetección para el estudio y gestión de los recursos naturales- CETEGERN, por facilitarnos el laboratorio de geoprocesamiento y análisis de datos espaciales para el desarrollo de la fase de gabinete en la investigación.

A nuestros amigos Matias Carrasco y Willian Ccapa que confiaron en nosotros y nos ayudaron con su tiempo en la fase de pre procesamiento y procesamiento de datos espaciales.

Al Centro de Innovación Científica Amazónica-CIN CIA, por brindarnos las escenas de alta resolución para la validación que facilito el proceso de validación de la investigación.

## **PRESENTACIÓN**

Esta investigación fue desarrollada como parte de los requisitos para la obtención de título profesional de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente, pero también como aporte para la evaluación sobre la variabilidad de la vegetación en zonas con alto impacto antrópico. Así, mediante este estudio, se determinó la variabilidad temporal de la vegetación en cuatro zonas deforestadas por minería aurífera (Huepetuhe, Delta, Dos de Mayo y La Pampa) y si la precipitación incide en la variación de la vegetación en el transcurso del tiempo. Confiamos en que la información obtenida pueda ser utilizada como herramienta en el desarrollo de proyectos de reforestación en áreas deforestadas por minería aurífera en el departamento de Madre de Dios, así como guía para realizar más estudios en diferentes zonas deforestadas.

## RESUMEN

El siguiente estudio constituye la evaluación de la Variabilidad temporal de la vegetación a través del Índice de Vegetación Mejorado (EVI), el cual permitirá determinar los estadios sucesionales en cuatro zonas impactadas por la actividad minera aurífera en la región de Madre de Dios, utilizando imágenes satelitales del sensor Landsat TM 5, ETM+ 7 y OLI 8 y datos de Precipitación adquiridos del sensor CHIRPS de la NASA en su servidor libre CLIMATE ENGINE, así como la correlación entre el índice y la precipitación durante el periodo 1985 – 2017. La tendencia de la vegetación a través del EVI fue analizada con el método no paramétrico de Mann- Kendall (MK), su magnitud con el método Theil – Sen (TS) y la correlación del EVI y la precipitación a través del coeficiente de Pearson.

Se determinó a través de métodos MK y TS, Huepetuhe presenta una superficie con deforestación de 6 404,8 ha de los cuales el 34,8% son superficies con tendencia positiva de regeneración, Delta posee una superficie deforestada de 6 764,3 ha de los cuales el 53,8% son áreas con tendencia positiva a regenerarse, Dos de Mayo tiene una superficie deforestada de 1 921,2 ha de los cuales el 50,8% presenta tendencia a regenerarse y La Pampa con una superficie deforestada de 4 280,1 ha de los cuales del 9,8% de su superficie poseen tendencia positiva a regenerarse; la correlación entre las variables EVI y Precipitación en las cuatro zonas de estudio fue un promedio de 0,5, lo cual indica que la vegetación aumenta independientemente de la cantidad de precipitación recibida. Los estadios sucesionales tienen un comportamiento diferenciado en el EVI, siendo los valores superiores a 0,2 áreas con cobertura vegetal. La validación del modelo presenta un nivel de concordancia (índice de Kappa) de 89% siendo esta un modelo casi perfecto.

**Palabras clave:** Variabilidad temporal, Índice de Vegetación Mejorado (EVI), Precipitación, sucesión ecológica, Tendencias temporales, Mann-Kendall, Theil-Sen, deforestación, minería, Huepetuhe, Delta, Dos de Mayo, La Pampa, Madre de Dios.

## ABSTRACT

The following study constitutes the evaluation of the temporal variability of the vegetation through the Index of Improved Vegetation (EVI), which will allow to determine the successional stages in four areas impacted by the gold mining activity in the region of Madre de Dios, using images Satellites of the Landsat TM 5 sensor, ETM + 7 and OLI 8 and Precipitation data acquired from NASA's CHIRPS sensor on its free CLIMATE ENGINE server, as well as the correlation between the index and precipitation during the 1985 - 2017 period. the vegetation through the EVI was analyzed with the non-parametric method of Mann-Kendall (MK), its magnitude with the Theil-Sen method (TS) and the correlation of the EVI and the precipitation through the Pearson coefficient.

It was determined through MK and TS methods, Huepetuhe presents a surface with deforestation of 6 404,8 ha of which 34,8% are areas with a positive trend of regeneration, Delta has a deforested area of 6 764,3 ha of which 53,8% are areas with positive tendency to regenerate, Dos de Mayo has a deforested area of 1 921,2 ha of which 50,8% has a tendency to regenerate and La Pampa with a deforested area of 4 280,1 ha of which of 9,8% of its surface have a positive tendency to regenerate; The correlation between the variables EVI and Precipitation in the four zones of study was an average of 0,5, which indicates that the vegetation increases independently of the amount of precipitation received. The successional stages have a differentiated behavior in the EVI, being the values superior to 0,2 areas with vegetation cover. The validation of the model presents a level of agreement (Kappa index) of 89%, this being an almost perfect model.

**Keywords:** Temporal variability, Improved Vegetation Index (EVI), Precipitation, ecological succession, Temporary trends, Mann-Kendall, Theil-Sen, deforestation, mining, Huepetuhe, Delta, Dos de Mayo, La Pampa, Madre de Dios.

## INDICE

INTRODUCCIÓN .....	16
CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	18
1.1 Descripción Del Problema .....	18
1.2 Formulación Del Problema .....	20
1.3 Objetivos .....	20
1.4 Variables .....	21
1.5 Operacionalización de Variables .....	22
1.6 Hipótesis.....	23
1.7 Justificación.....	23
1.8 Consideraciones Éticas .....	24
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO .....	25
2.1 Antecedentes De Estudio .....	25
2.1.1 Internacional .....	25
2.1.2 Nacional.....	30
2.1.3 Local .....	31
2.2 Marco referencial.....	32
2.2.1 El Espectro Electromagnético:.....	32
2.2.2 Fundamentos Físicos de la Teledetección:.....	34
2.2.3 Principios generales de la teledetección:.....	37
2.2.4 El Programa LANDSAT .....	44
2.2.6 CHIRPS .....	46
2.2.7 Análisis Visual de Imágenes RGB para imágenes Landsat .....	48
2.2.8 Tratamiento Digital De Imágenes Satelitales .....	49
2.2.8.1 Corrección Geométrica .....	49
2.2.8.2 Calibración Radiométrica.....	50
2.2.8.2.1 Calibración Absoluta .....	50
2.2.8.2.2 Calibración Relativa .....	51
2.2.9 Índices de Vegetación.....	51
2.2.9.1 Composición y Aplicaciones .....	52



2.2.9.2 Limitaciones de los índices de vegetación .....	53
2.2.10 Índice de vegetación mejorado (EVI) .....	55
2.2.11 Minería aurífera .....	55
2.2.12 Regeneración natural.....	56
2.2.13 Especies pioneras.....	57
2.2.14 Índice de Kappa .....	57
<b>CAPITULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION .....</b>	<b>61</b>
3.1 Tipo de estudio.....	61
3.2 Diseño del estudio.....	61
3.3 Población y muestra .....	62
3.4 Métodos y técnicas.....	63
3.4.1 Lugar de estudio .....	63
3.4.2 Adquisición de datos.....	65
3.4.3 Pre procesamiento de datos .....	68
3.4.3.1 Pre procesamiento de imágenes de satélite.....	68
3.4.4 Procesamiento de datos .....	70
3.5 Tratamiento de los datos .....	71
<b>CAPITULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACION .....</b>	<b>82</b>
4.1 Análisis de los datos de precipitación.....	82
4.1.1 Análisis de la precipitación en las 4 zonas de estudio .....	82
4.2 Análisis de tendencia temporal de los datos de vegetación .....	104
4.2.1 Análisis de tendencia temporal de la vegetación en la zona Huepetuhe .....	105
4.2.2 Análisis de tendencia temporal de la vegetación en la zona Delta .	111
4.2.3 Análisis de tendencia temporal de la vegetación en la zona Dos de Mayo .....	117
4.2.4 Análisis de tendencia temporal de la vegetación de la zona La Pampa .....	123
4.3 Comparación del régimen de lluvias y la evolución de la vegetación....	129
4.3.1 Relación espacial y temporal entre el EVI y la Precipitación en la zona de estudio Huepetuhe.....	129
4.3.2 Relación espacial y temporal entre el EVI y la Precipitación en la zona de estudio Delta.....	132

4.3.3 Relación espacial y temporal entre el EVI y la Precipitación en la zona de estudio Dos de Mayo .....	135
4.3.4 Relación espacial y temporal entre el EVI y la Precipitación en la zona de estudio La Pampa.....	138
4.4 Perfil vertical de los estadios sucesionales de la vegetación en las zonas de estudio.....	141
4.4.1 Estadios sucesionales de la vegetación para la zona de estudio Huepetuhe. ....	142
4.4.2 Estadios sucesionales de la vegetación para la zona de estudio Delta. ....	143
4.4.3 Estadios sucesionales de la vegetación para la zona de estudio Dos de Mayo.....	144
4.4.4 Estadios sucesionales de la vegetación para la zona de estudio La Pampa. ....	145
4.4.5 Valores de EVI para diferentes tipos de cobertura .....	147
4.5 Evaluación de precisión.....	148
4.5.1 Matriz de confusión.....	148
CONCLUSIONES .....	150
SUGERENCIAS.....	153
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	154
ANEXOS.....	164

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro Electromagnético-----	34
Figura 2: Esquema de una onda magnética-----	35
Figura 3: Comportamiento de la radiación electromagnética en la tierra. -----	37
Figura 4. Concepto de sensor remoto. -----	40
Figura 5. Satélite Landsat.-----	42
Figura 6. Combinación de Colores RGB-----	48
Figura 7. Comportamiento de los índices de vegetación sobre la reflectancia en diversas longitudes de onda. -----	53
Figura 8. Ubicación de las zonas de estudio. -----	64
Figura 9. Proceso de transformación de coordenadas -----	69
Figura 10. Flujo de procesos de procesamiento de datos de precipitación. ----	70
Figura 11. Valores de NDVI para Madre de Dios.-----	72
Figura 12. Precipitación mensual de las fechas establecidas según la adquisición de las imágenes satelitales.-----	83
Figura 13. Mapa de precipitación anual promedio en la zona de estudio Huepetuhe en el periodo 1985-2017.-----	84
Figura 14. Coeficiente de Determinación $R^2$ para la zona de estudio Huepetuhe en el periodo 1985-2017. -----	85
Figura 15. Test de tendencia Mann Kendall para la zona de Huepetuhe en el periodo de estudio 1985-2017.-----	86
Figura 16. Magnitud de la pendiente Theil-Sen para la zona de Huepetuhe en el periodo de estudio 1985-2017.-----	88
Figura 17. precipitación mensual de las fechas establecidas según la adquisición de las imágenes satelitales.-----	88
Figura 18. Mapa de precipitación anual promedio en la zona de estudio Delta en el periodo 1985-2017. -----	90
Figura 19. Coeficiente de Determinación $R^2$ para la zona de estudio Delta en el periodo 1985-2017.-----	91

Figura 20. Test de tendencia Mann Kendall para la zona de Delta en el periodo de estudio 1985-2017.-----	92
Figura 21. Magnitud de la pendiente Theil-Sen para la zona de Delta en el periodo de estudio 1985-2017.-----	93
Figura 22. Precipitación mensual de las fechas establecidas según la adquisición de las imágenes satelitales.-----	94
Figura 23. Mapa de precipitación anual promedio en la zona de estudio Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.-----	95
Figura 24. Coeficiente de Determinación $R^2$ para la zona de estudio Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.-----	96
Figura 25. Test de tendencia Mann Kendall para la zona de Dos de Mayo en el periodo de estudio 1985-2017.-----	97
Figura 26. Magnitud de la pendiente Theil-Sen para la zona de Dos de Mayo en el periodo de estudio 1985-2017.-----	99
Figura 27. Precipitación mensual de las fechas establecidas según la adquisición de las imágenes satelitales.-----	99
Figura 28. Mapa de precipitación anual promedio en la zona de estudio La Pampa en el periodo 1985-2017.-----	101
Figura 29. Coeficiente de Determinación $R^2$ para la zona de estudio de La Pampa en el periodo 1985-2017.-----	102
Figura 30. Test de tendencia Mann Kendall para la zona de La Pampa en el periodo de estudio 1985-2017.-----	103
Figura 31. Magnitud de la pendiente Theil-Sen para la zona de La Pampa en el periodo de estudio 1985-2017.-----	104
Figura 32. Mapa de EVI promedio para la zona de estudio Huepetuhe en el periodo 1985-2017.-----	107
Figura 33. Perfil temporal del EVI promedio para la zona de estudio Huepetuhe en el periodo de estudio 1985-2017.-----	107
Figura 34. Coeficiente de Determinación $R^2$ para la zona de estudio Huepetuhe en el periodo de estudio 1985-2017.-----	108

Figura 35. Test de Tendencia Mann Kendall para la zona de estudio Huepetuhe en el periodo de estudio 1985-2017. -----	109
Figura 36. Magnitud de la pendiente Theil Sen para la zona de estudio Huepetuhe en el periodo 1985-2017.-----	111
Figura 37. Mapa de EVI promedio para la zona de estudio Delta en el periodo 1985-2017.-----	112
Figura 38. Perfil temporal del EVI promedio para la zona de estudio Delta en el periodo de estudio 1985-2017.-----	113
Figura 39. Coeficiente de Determinación R <sup>2</sup> para la zona de estudio Delta en el periodo de estudio 1985-2017.-----	114
Figura 40. Test de Tendencia Mann Kendall para la zona de estudio Delta en el periodo 1985-2017.-----	115
Figura 41. Magnitud de la pendiente Theil Sen para la zona de estudio Delta en el periodo de estudio 1985-2017.-----	117
Figura 42. Mapa de EVI promedio para la zona de estudio Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.-----	118
Figura 43. Perfil temporal del EVI promedio para la zona de estudio Dos de Mayo en el periodo 1985-2017. -----	119
Figura 44. Coeficiente de Determinación R <sup>2</sup> para la zona de estudio Dos de Mayo en el periodo 1985-2017. -----	120
Figura 45. Test de Tendencia Mann Kendall para la zona de estudio Dos de Mayo en el periodo 1985-2017. -----	121
Figura 46. Magnitud de la pendiente Theil Sen para la zona de estudio Dos de Mayo en el periodo 1985-2017. -----	123
Figura 47. Mapa de EVI promedio para la zona de estudio La Pampa en el periodo 1985-2017. Fuente: Elaboración propia.-----	124
Figura 48. Perfil temporal del EVI promedio para la zona de estudio La Pampa en el periodo de estudio 1985-2017. -----	125
Figura 49. Coeficiente de Determinación R <sup>2</sup> para la zona de estudio La Pampa en el periodo de estudio 1985-2017. -----	126

Figura 50. Test de tendencia Mann Kendall para la zona de estudio La Pampa en el periodo de estudio 1985-2017. -----	127
Figura 51. Magnitud de la pendiente Theil Sen para la zona de estudio La Pampa en el periodo de estudio 1985-2017. -----	128
Figura 52. Valor promedio entre 1985-2017 del EVI (izquierda) y la precipitación (derecha), datos del sensor CHIRPS, para la zona de estudio Huepetuhe. ---	130
Figura 53. Coeficiente de correlación (r) entre datos EVI y Precipitación para la zona de estudio Huepetuhe. -----	131
Figura 54. Perfil temporal entre el EVI y Precipitación. -----	132
Figura 55. Valor promedio entre 1985-2017 del EVI (izquierda) y la precipitación (derecha), datos del sensor CHIRPS, para la zona de estudio Delta. -----	133
Figura 56. Coeficiente de correlación (r) entre datos EVI y Precipitación para la zona de estudio Delta. -----	134
Figura 57. Perfil temporal entre el EVI y Precipitación. -----	135
Figura 58. Valor promedio entre 1985-2017 del EVI (parte derecha) y la precipitación (parte izquierda), datos del sensor CHIRPS, para la zona de estudio Dos de Mayo. -----	136
Figura 59. Coeficiente de correlación (r) entre datos EVI y Precipitación para la zona de estudio Dos de Mayo. -----	137
Figura 60. Perfil temporal entre el EVI y Precipitación. -----	138
Figura 61. Valor promedio entre 1985-2017 del EVI (parte derecha) y la precipitación (parte izquierda), datos del sensor CHIRPS, para la zona de estudio La Pampa. -----	139
Figura 62. Coeficiente de correlación (r) entre datos EVI y Precipitación para la zona de estudio La Pampa. -----	140
Figura 63. Perfil temporal entre el EVI y Precipitación. -----	141
Figura 64. Etapas sucesionales de la vegetación en función al EVI en la zona de estudio Huepetuhe. -----	142
Figura 65. Etapas sucesionales de la vegetación en función al EVI en la zona de estudio Delta. -----	143

Figura 66. Etapas sucesionales de la vegetación en función al EVI en la zona de estudio Dos de Mayo.-----	144
<i>Figura 67.</i> Etapas sucesionales de la vegetación en función al EVI en la zona de estudio La Pampa.-----	146
Figura 68. Clasificación de superficies a partir de la dispersión de los valores del EVI. -----	147

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cuadro de Variables .....	22
Tabla 2. Aplicaciones de las diferentes bandas espectrales .....	46
Tabla 3. Datos de entrada del algoritmo CHIRPS .....	47
Tabla 4. Características de los datos de precipitación CHIRPS .....	48
Tabla 5. Valoración del coeficiente de Kappa .....	58
Tabla 6. Ubicación Política .....	63
Tabla 7. Escenas Landsat a utilizar .....	66
Tabla 8. Valores del coeficiente de correlación Pearson. ....	77
Tabla 9. Cuadro de resumen con medidas estadísticas descriptivas de la precipitación en la Zona de Huepetuhe para el periodo comprendido 1985-2017. ....	83
Tabla 10. Cuadro de resumen con medidas estadísticas descriptivas de la precipitación en la Zona de Delta para el periodo comprendido 1985-2017. ....	89
Tabla 11. Cuadro de resumen con medidas estadísticas descriptivas de la precipitación en la Zona de Dos de Mayo para el periodo comprendido 1985-2017. ....	94
Tabla 12. Cuadro de resumen con medidas estadísticas descriptivas de la precipitación en la Zona de La Pampa para el periodo comprendido 1985-2017. ....	100
Tabla 13. Descripción de estratificación vertical de los estadios sucesionales	141
Tabla 14. Matriz de confusión .....	148
Tabla 15. Precisión de resultados para la investigación. ....	148



## INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Formato de campo para validación.....	164
Anexo 2: Mapa de dispersión de puntos de validación y tabla de coordenadas. .....	165
Anexo 3: Fotos de validación en campo. ....	173

## INTRODUCCIÓN

La deforestación de los bosques amazónicos producida por la tala indiscriminada, tanto por la extracción ilegal de madera como por la actividad minera aurífera, es el principal problema ambiental que atraviesa la Amazonia Peruana, el Perú no ha sido ajeno al problema de la deforestación de la cobertura vegetal por ser fuente económica para la población, de esta manera se conoce la importancia que tienen los bosques frente a la pobreza y el medio ambiente, sin embargo, el ritmo de deforestación sigue siendo alarmante (Rojas 2017), en Madre de Dios esta situación se debe a la creciente actividad minera aurífera, se estima que produce el 70% del oro de la minería artesanal del país (Romero, Pachas y Zambrano 2005), en la región se extrae oro desde hace más de 40 años mediante diferentes métodos de extracción (MINAM 2011), siendo la actividad económica principal de la población económicamente activa (BCRP 2011).

Para Madre de Dios diferentes instituciones cuantificaron la deforestación en distintos periodos siendo las más recientes la reportada por la Dirección general de ordenamiento territorial (2016) del Ministerio del Ambiente, la cual reporta que en los últimos 15 años se deforestaron 77 984,72 ha, siendo la actividad minera aurífera la principal debido al alto precio y demanda de este producto.

En la actualidad en la Madre de Dios se vienen realizan diversos estudios de deforestación en zonas deforestadas por minería aurífera dejando de lado los reportes sobre regeneración natural en dichas zonas, pero no toman el grado de recuperación y la variación espacial temporal de la vegetación desde el momento en que se iniciaron las actividades extractivas, así como las diferentes variables ambientales y climáticas que pueden influir en la variabilidad de la vegetación y las tendencias que estas puedan sufrir a lo largo del tiempo.

En la actualidad existe la tecnología de la percepción remota que ha mejorado continuamente, la cual permite dar un monitoreo firme de la cobertura vegetal (Cabello y Paruelo 2008), a través del cual ha sido posible describir los constantes cambios de los sistemas ecológicos y obtener información sobre la

cobertura vegetal, cuenta con una gran variedad de base de datos espaciales como son los sensores del satélite LandSat 5, 7 y 8 , el multisatelite Sentinel y satélites de alta resolución espacial como WorldView, Planet, PeruSat, etc., que permiten dar un seguimiento constante a la cobertura vegetal.

Puig (2015), reporta que ante la escasez de estaciones meteorológicas para el seguimiento constante a las variables climáticas se cuenta con sensores meteorológicos que estiman datos de precipitación, la cual optimiza el monitoreo de los regímenes pluviométricos en lugares donde no se cuentan con estaciones meteorológicas.

En este contexto, esta investigación busca llenar aquellos vacíos de información, sobre la variabilidad temporal de vegetación en cuatro zonas impactadas por minería aurífera y si la precipitación influye en la dinámica de la vegetación. La información generada servirá de instrumento útil al aportar información sobre zonas que tengan una tendencia a regenerarse a lo largo del tiempo.

## **CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1 Descripción Del Problema**

La deforestación de los bosques amazónicos producida por la tala indiscriminada, tanto por la extracción ilegal de madera como por la actividad minera aurífera, es el principal problema ambiental que atraviesa la Amazonia Peruana.

Los bosques de la región de Madre de Dios poseen un valor ecológico muy alto, asimismo, posee un alto grado de diversidad biológica, reportándose los más altos índices de mamíferos terrestres y arbóreos en la amazonia (Voss y Emmons 1996).

Esta situación se ve confrontada con la creciente extracción minera aurífera; se estima que Madre de Dios produce el 70% del oro de la minería artesanal del país (Romero, Pachas y Zambrano 2005), al 2011 se producían entre 16 000 a 18 000 kg de oro al año representando el 9,2% de producción de oro del Perú (MINAM 2011).

En Madre de Dios se extrae oro desde hace más de 40 años mediante 4 métodos de extracción, artesanales (carretillas e implementos muy simples), extracción con motobombas y chupaderas en los suelos y dentro del bosque, extracción con diversos tipos de dragas en los lechos de los ríos y extracción con maquinaria pesada incluye cargadores frontales y volquetes (MINAM 2011). En el año 2015, la producción minera aurífera del departamento de Madre de Dios representó el 40,8% del valor agregado bruto departamental. En la Región, esta actividad es una parte importante de su Población Económicamente Activa (BCRP 2011).

La Dirección General de Ordenamiento Territorial (2016) reportó que en los últimos 15 años se deforestaron 77 984,72 ha en Madre de Dios, siendo la actividad minera aurífera la principal debido al alto precio del oro y la demanda

de este producto (Swenson et al. 2011), asimismo Asner et al. (2013), indica que la actividad minera aurífera en Madre de Dios hasta el año 2012 ha deforestado 50 000 ha, a un ritmo de 6 145 hectáreas anuales en los últimos años, en el último periodo 2010-2014 se deforestó 25 428,32 ha según reporta la (Dirección General de Ordenamiento Territorial 2015).

En la actualidad en Madre de Dios se realizan diversos estudios regeneración natural en áreas deforestadas por minería con los métodos clásicos mediante composición florística, también se realizan estudios de deforestación en zonas deforestadas por minería aurífera pero no toman en cuenta el grado de recuperación y la variación espacial temporal de la vegetación desde el inicio de las actividades extractivas a la actualidad, no toman en cuenta los diferentes variables ambientales y climáticos que pueden influir en la variabilidad de la vegetación.

Cabello y Paruelo (2008) indican que existe tecnología que ha permitido dar seguimiento a la deforestación y a la variabilidad espacial temporal de la vegetación, como es la teledetección, el cual ha sido capaz de describir aspectos funcionales de los sistemas ecológicos y de brindar información sobre la estructura del bosque, por medio de tratamiento digital de las imágenes satelitales, basado en la clasificación de los píxeles en función de su comportamiento reflexivo (Angulo, Suárez y López 2013), a la actualidad se cuenta con diversidad de imágenes satelitales para dar seguimiento a la variabilidad espacial temporal de la vegetación como son los productos del satélite Landsat con sus diferentes misiones ( Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 Oli); la cual cuenta con una base de datos desde el año 1984 hasta la actualidad, también encontramos a las imágenes obtenidas del multi-satélite Sentinel que cuenta con imágenes desde el 2015 a la actualidad, (Puig 2015) indica que ante la escases de estaciones meteorológicas para el monitoreo constante de las variables climáticas se cuenta con sensores meteorológicos que estiman datos de precipitación la cual facilita el constante monitoreo de los

regímenes pluviométricos en diferentes zonas donde no se cuentan con estaciones meteorológicas.

## **1.2 Formulación Del Problema**

### **Problema General:**

¿Existe variabilidad temporal de la vegetación en el periodo 1985-2017, en cuatro zonas impactadas por minería aurífera?

### **Problema Específicos:**

- ¿Cuál es el régimen de precipitación para las cuatro zonas de estudios?
- ¿Cuál es el comportamiento del Índice de vegetación mejorado (EVI) en las cuatro zonas de estudio?
- ¿Existe relación entre la precipitación y el índice de vegetación mejorado (EVI)?
- ¿Cómo será la dinámica de la vegetación en las cuatro zonas de estudio?

## **1.3 Objetivos**

### **Objetivo General**

Evaluar variabilidad temporal de la vegetación en cuatro zonas impactadas por la minería aurífera en la región de Madre de Dios mediante el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) y su relación con la precipitación en el periodo 1985-2017.

### **Objetivos Específicos**

- Determinar la precipitación para las zonas de estudio para el periodo de investigación.
- Determinar el índice de vegetación mejorado (EVI), para el periodo de investigación.
- Determinar la correlación entre las variables Índice de Vegetación Mejorado (EVI) y Precipitación.

- Caracterizar la dinámica de la vegetación en las zonas de estudio mediante el análisis de series temporales a través de la respuesta espectral del índice de vegetación mejorada (EVI).

#### **1.4 Variables**

##### **Variables dependientes:**

Índice de Vegetación Mejorado (EVI):

Estadios Sucesionales

Vegetación

##### **Variables independientes:**

Comportamiento del objeto en función mínima de la imagen (Píxel)

Precipitación

Tiempo

## 1.5 Operacionalización de Variables

En la Tabla 1 se muestra la Operacionalización de las variables identificadas.

Tabla 1. *Cuadro de Variables*

OBJETIVOS ESPECIFICOS	VARIABLES	Tipo de variable	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	INDICADOR
Determinar el índice de vegetación mejorado	EVI	Dependiente	Provee información que permite monitorear el estado de la vegetación	Mide el estado de la vegetación a través de su firma espectral.
Determinar la precipitación para las zonas de estudio para el periodo de investigación	Precipitación	Dependiente	Es cualquier forma de hidrometeoro que cae del cielo y llega a la superficie terrestre. Este fenómeno incluye lluvia, llovizna, nieve, aguanieve, granizo	mm/mes
Caracterizar la dinámica de la vegetación en las zonas de estudio mediante el análisis de series temporales a través de la respuesta espectral del índice de vegetación mejorada (EVI).	Pixel	Independiente	Cada uno de los elementos que componen una imagen, dispuestos matricialmente en filas y columnas	Función mínima de la imagen
	Tiempo	Independiente		Años
	Vegetación	Independiente	Conjunto de los vegetales propios de un lugar o región, o existentes en un terreno determinado.	Estadios sucesiones



## 1.6 Hipótesis

**Hipótesis alterna:** Mediante el índice de vegetación mejorado (EVI) obtenido a partir de imágenes satelitales Landsat se podrá evaluar la variabilidad espacial y temporal de la vegetación en zonas deforestadas por minería aurífera.

**Hipótesis nula:** Mediante el índice de vegetación mejorado (EVI) obtenido a partir de imágenes satelitales Landsat no se podrá evaluar la variabilidad espacial y temporal de la vegetación en zonas deforestadas por minería aurífera.

## 1.7 Justificación

La restauración de áreas deforestadas por las actividades antrópicas como la minería, tala ilegal, etc., han tenido poco éxito en la Amazonia Peruana, debido a la escasez de estudios científicos para determinar el nivel de impacto, variabilidad espacial temporal de la vegetación y factores climatológicos que puedan influir en la dinámica de la vegetación ocasionado por estas actividades antrópicas en los ecosistemas forestales (Osores, Rojas y Lara 2012).

Recientemente en Madre De Dios se realizan diversos estudios de regeneración natural en áreas deforestadas por minería con los métodos clásicos mediante composición florística, también se realizan estudios de deforestación en zonas deforestadas por minería aurífera pero no toman en cuenta el grado de recuperación y la variación espacial temporal de la vegetación desde el momento en que se iniciaron las actividades extractivas hasta la actualidad, no toman en cuenta los diferentes variables ambientales y climáticos que pueden influir en la variabilidad de la vegetación.

El desarrollo de esta investigación buscará llenar aquellos vacíos de información, sobre la variabilidad espacial temporal de vegetación y si la precipitación influye en la dinámica de la misma en áreas deforestadas por minería aurífera, además servirá de referencia en posteriores estudios.

La información generada con la investigación sobre variabilidad histórica de la vegetación en zonas impactadas por minería aurífera se tendrá en cuenta para proyectos de recuperación de zonas deforestadas por minería aurífera que son desarrollados e impulsados por ONG's e instituciones del Estado para bienestar de las poblaciones aledañas.

### **1.8 Consideraciones Éticas**

La ejecución de la investigación no tendrá ningún tipo de riesgo para los Tesistas y las personas que colaboraran en la ejecución de la misma. La validación de campo será previamente autorizada por los titulares mineros para realizar la verificación in situ, acciones que se realizarán sin causar daños ni perjuicios al titular de la concesión. El análisis de los datos obtenidos en campos fue procesado en el Centro de Teledetección para el Estudio y Gestión de Recursos Naturales de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

Durante la fase de gabinete y campo se usarán materiales amigables con el medio ambiente e implementos de seguridad para la fácil manipulación de los instrumentos sin correr ningún riesgo.

## **CAPITULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Antecedentes De Estudio**

#### **2.1.1 Internacional**

Puig (2015), realizo una investigación en el Sahel, la zona de transición entre el desierto del Sahara en el norte y la sabana húmeda tropical en el sur, indicó que el desarrollo y la prosperidad de la población depende en gran medida del régimen de lluvias, también indica que El Sahel es la región donde se han evidenciado las mayores variaciones de precipitación y vegetación en las últimas tres o cuatro décadas.

Indica que los avances tecnológicos en el campo de la teledetección han permitido la vigilancia de los ecosistemas gracias a la disponibilidad de datos con resoluciones espaciales, temporales y espectrales cada vez mejores.

Investigó los patrones temporales y espaciales de la vegetación y la variabilidad de las precipitaciones en el Sahel a través de las interrelaciones basadas en el análisis de series temporales del índice de vegetación normalizado (NDVI) en el periodo 1983-2012 y las estimaciones de precipitación procedentes de satélite. Mientras que la precipitación emerge como una causa dominante del aumento de la vegetación, hay evidencias de otros factores de carácter antropogénico superpuestos a la tendencia del clima.

Indica que medir la precipitación en las regiones semiáridas sigue siendo un punto crítico por la gran variabilidad espacial y temporal de la misma, determino que los datos de satélite, en combinación con las mediciones de las estaciones meteorológicas, son actualmente el mejor medio de adquisición de información espacio-temporal de la precipitación en el Sahel, analizó tres series temporales de precipitación que cubrieron el periodo comprendido entre 1983 y 2012: GPCC, ARC2, TAMSAT. Indica que estas series se han comparado con otras más recientes y que proporcionaron estimaciones de mejor calidad: RFE2, TRMM

3B42 y GPCP-1dd. El resultado arrojó una buena correspondencia entre las series GPCC, ARC2, RFE2 y TRMM 3B42. El análisis de 30 años de precipitación que realizó muestra que la precipitación anual se ha recuperado, aunque la tendencia en la distribución temporal anual ha cambiado: determinó que ahora llueve más, pero durante menos tiempo.

Indica que desde 1981 se dispone de datos del NDVI procedentes del sensor AVHRR y en su versión GIMMS3g. Sin embargo, hay aspectos en el diseño y procesamiento de los datos del sensor que introducen ruido en los datos. Indica que existen conjuntos de datos del NDVI más recientes procedentes de los sensores VEGETATION y MODIS embarcados en los satélites SPOT y Terra, respectivamente, que se consideran una mejora sobre los datos AVHRR GIMMS3g, y estos productos ofrecen la posibilidad de evaluar la exactitud en el análisis de la tendencia de las series de tiempo del AVHRR GIMMS3g en el periodo de tiempo en el que los datos se solapan, de 2001 a 2012, a partir de lo cual se observa que el conjunto de datos AVHRR GIMMS3g es adecuado en estudios temporales de la vegetación en áreas que no reciben más de 1 000 mm de precipitación, mientras que en la interpretación de las tendencias temporales en las zonas más húmedas debe de hacerse con ciertas reservas y analizándolos detalladamente para posteriormente mostrar resultados.

Maita (2015), realizó la evaluación de la dinámica espacio temporal del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) en los ecosistemas de la Región Sur del Ecuador, utilizando imágenes satelitales del sensor MODIS de los satélites Aqua (MYD13Q1) y Terra (MOD13Q1), así como la correlación entre este índice y datos de temperatura y precipitación mensuales de 41 estaciones meteorológicas provenientes del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), durante el periodo 2000 – 2014. La tendencia del EVI fue analizada a través del método no paramétrico de Mann- Kendall Contextual (MKC), su magnitud con el método Theil – Sen (TS) y la correlación del EVI con la precipitación y la temperatura a través del coeficiente de Pearson. Donde siete ecosistemas presentaron un cambio negativo estadísticamente significativo ( $p < 0.05$ ) del EVI mayor al 50 % de su superficie. El ecosistema con mayor cambio negativo

reportado fue el Arbustal siempre verde y Herbazal del Páramo (AsSn01) presentándose en el 75% de su superficie; y el mayor cambio positivo en el ecosistema Intervención en el 8.2% de su área. Con relación a las provincias, Zamora Chinchipe presentó en el 50.4% de su superficie la mayor tendencia negativa estadísticamente significativa, Cañar la mayor tendencia positiva en el 15% de su área y por último las Zonas de Deforestación obtuvieron tendencias negativas en el 43.5% de su área.

Alatorre, Begueria y Serrano (2010), realizaron un estudio analizando la evolución temporal y espacial de la dinámica vegetal sobre coberturas de suelo en el Pirineo central, España, utilizando dos series temporales de NDVI, la primera corresponde al mes de Abril (Inicio de la Primavera) y la segunda al mes de Agosto (Final de Verano), las series fueron construidas a partir de imágenes Landsat TM y ETM+ para el periodo del 1984-2007, en la cual los resultados muestran un incremento del NDVI en el mes de marzo para las áreas vegetadas, mientras que en áreas degradadas presentaron una tendencia negativa del NDVI, también resaltan que el incremento de las temperaturas mínimas durante el periodo de estudio fue un factor importante para explicar el incremento del NDVI en las áreas vegetadas, en áreas degradadas, no encontraron ninguna variable climática o topográfica que explicara la tendencia negativa del NDVI, lo cual lo relacionaron con los procesos de erosión acelerada que se dan en esa región.

Alcaraz et al. (2008), determinaron que las series temporales de imágenes de satélite constituyen una excelente herramienta para analizar los cambios en diferentes aspectos del funcionamiento de la vegetación y, por lo tanto, para el conocimiento y la gestión de áreas protegidas, en este trabajo muestran tres aproximaciones para evaluar cambios en el promedio anual, la estacionalidad, y la inestabilidad de la dinámica temporal (cambios abruptos) de la capacidad fotosintética de la vegetación en tres zonas de estudio: las áreas protegidas de Sudamérica, los parques nacionales españoles, y dos parques naturales andaluces. Para cada análisis emplearon sendas bases de datos del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI), un índice espectral estimador

de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación, las áreas protegidas de Sudamérica y los parques nacionales de España mostraron tendencias significativas en la dinámica del NDVI que variaron en magnitud y sentido en función de su situación geopolítica y biogeográfica. Los parques naturales andaluces mostraron de qué manera diferentes manejos históricos han ocasionado una disminución en la estabilidad de la dinámica temporal del NDVI de determinados ecosistemas, en conjunto, estas evaluaciones revelaron cómo las políticas de conservación de la biodiversidad en áreas protegidas no pueden basarse en situaciones estáticas o promedio, ya que el funcionamiento de sus ecosistemas varía en diferentes aspectos. Asimismo, estas aproximaciones proporcionan información valiosa para establecer prioridades en conservación, al ser capaces de responder a preguntas tales como ¿Qué biomas, países o parques están sufriendo mayores cambios? o ¿Qué medidas de manejo proporcionan mayor estabilidad al ecosistema?

Serrano, Begueria y Lasanta (2006), analizaron la evolución temporal del índice de vegetación normalizado (Normalizad Difference Vegetation Index, NDVI), obtenido a partir de imágenes Landsat-TM y ETM+, en un sector del Pirineo central español. Utilizando tres imágenes de agosto de los años 1984, 1991 y 2001, con una escasa diferencia en días en la toma de las mismas para garantizar la homogeneidad en la fenología de la vegetación, las imágenes fueron corregidas geométrica y atmosféricamente siguiendo un método mixto basado en un modelo físico y procedimientos estadísticos. A partir de las imágenes de NDVI calcularon coeficientes de variación móviles en un radio de 150 metros, analizaron la variabilidad espacial en la actividad vegetal. Indican que los cambios en el NDVI han sido poco importantes durante el periodo analizado, existiendo escasas diferencias entre las tres imágenes. Sin embargo, indican que sí se han producido cambios apreciables en la variabilidad espacial de la actividad vegetal, como consecuencia de procesos de homogeneización/heterogeneización, comprobaron que en las áreas de bosques localizadas a mayor altitud se ha producido un proceso de homogeneización de la cubierta vegetal y en las partes más bajas se han incrementado la diversidad

espacial, reflejando un dominio de procesos de heterogeneización, también indicaron que esta ha sido menor en las zonas de bosque que en las áreas cubiertas por vegetación esclerófila y en las de transición matorral/bosque, espacios que se encuentran en fases más tempranas de sucesión tras el abandono agrícola y en las que la sucesión se caracteriza por un aumento de la heterogeneidad espacial.

Gonzaga (2014), evaluó las variaciones de las coberturas vegetales en la superficie terrestre, en determinados periodos de tiempo, indica también que la teledetección ha sido utilizada como valiosa herramienta y determinante a la hora de establecer indicadores de degradación y conservación de los recursos naturales, de manera especial en evaluar dinámicas en los cambios de usos de suelo y coberturas vegetales, en ese sentido, el estudio consistió en la evaluación de tres índices de vegetación, como estimadores de cambios de diferentes tipos de cobertura vegetal en la provincia de Loja al sur de Ecuador. Los índices empleados fueron: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI, Índice de Estrés Hídrico MSI y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo SAVI, aplicados a imágenes provenientes de dos sensores, Landsat 7 ETM+ y ASTER. Además, aplicaron técnicas de análisis espacial como kriging para establecer superficies climáticas, generadas a partir de datos de precipitación y temperatura para verificar la relación del vigor vegetal de las coberturas, dada por los valores de los índices de vegetación, con respecto a estas variables climáticas. Los resultados muestran que los tres índices de vegetación permitieron discriminar los diferentes tipos de cobertura vegetal analizadas, indica que no hubo diferencias significativas entre los tres, en cuanto a la capacidad para estimar el estado de las coberturas el MSI fue el índice que tuvo ligeramente mejor correspondencia entre sus valores y los estados de las coberturas vegetales en las dos imágenes.

Las insuficiencias y vacíos de datos climáticos en el área de estudio indica que no permitieron obtener superficies de precipitación y temperatura adecuadas; esto influyó al momento de establecer correlaciones entre estas variables

climáticas y los índices de vegetación, no se encontraron correlaciones significativas.

Finalmente, empleó una técnica de análisis espacial, que, a partir de una red de elevaciones contenidas en un modelo de elevación digital, permitió determinar las diferencias entre el área real y el área proyectada para cada cobertura presente en la zona de estudio la cual presenta relieves irregulares.

### **2.1.2 Nacional**

Guerrero (2011), determino que el uso de nuevas tecnologías en el campo de la agricultura ha permitido que los productores agrícolas, en diversos países desarrollados, accedan a nuevos mercados internacionales avalados por la calidad de sus productos, también indica que la calidad que han logrado fue teniendo una mejor gestión de sus cultivos en base a tecnologías tales como los Sistemas de Información Geográfica, los cuales se convirtieron en una herramienta vital para la aplicación de la llamada Agricultura de Precisión, la investigación busco desarrollar una interfaz que haga uso de las herramientas propias de los Sistemas de Información Geográfica, en particular del SIG GRASS, para la integración y el posterior análisis de imágenes multiespectrales de cultivos adquiridas mediante el uso de un sistema de sensado remoto desarrollado en la Pontificia Universidad Católica del Perú, con las cuales se permita evaluar la situación actual de los mismos, en base al índice vegetativo conocido como factor NDVI.

Tuvo como conclusión de que el SIG GRASS permite procesar, analizar y posteriormente visualizar la información generada en base a las imágenes multiespectrales. Así mismo, se concluye que la generación de archivos Geo TIFF permite la integración de las imágenes capturadas con sus respectivas coordenadas geográficas de tal manera que, las imágenes que se manipulen en GRASS estén apropiadamente georreferenciadas.



### 2.1.3 Local

Rojas (2017), realizó una investigación donde muestra la utilidad de las imágenes de satélite y su importancia en la detección y estimación de la cuantificación de áreas deforestadas a causa de la minería aurífera aluvial, el área de estudio donde realizó la investigación es la Quebrada Guacamayo ubicada en la región Madre de Dios, Perú. En la investigación utilizó imágenes de satélite registradas por los sensores TM, ETM+ y OLI (resolución espacial de 30 m x 30 m) a bordo de los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8, respectivamente. Estas imágenes fueron procesadas mediante el software de procesamiento de imágenes ENVI v5.2, obteniendo la reflectancia de la superficie del suelo. Posteriormente calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) el cual fue utilizado para determinar los umbrales mediante la técnica de segmentación por umbrales. Esta técnica se basa en la conglomeración de píxeles de un determinado tipo de superficie que a su vez permite delimitar las áreas deforestadas por minería aurífera de suelos desnudos de escasa vegetación, vegetación natural, áreas de cultivo y cuerpos de agua. De acuerdo al análisis de la segmentación aplicado a las imágenes, determinó que el umbral superior fue de 0.52, mientras que el umbral inferior fue de -0.28. Los resultados obtenidos muestran que la deforestación por minería aurífera en la Quebrada Guacamayo, comenzó a desarrollarse entre los años 2006 y 2007. También determinó que la tasa promedio anual durante el periodo de estudio (2006 – 2015) fue de 1 260 ha/año, también reportó que el mayor incremento anual de la deforestación por esta actividad, se dio entre los años 2010 – 2011, a raíz de un incremento del precio del oro para este periodo, con un área estimada de 1 746.45 ha. Finalmente, determinó que los datos del precio promedio anual del oro y el incremento anual de la deforestación por minería aurífera, presenta una alta relación lineal entre ambas variables, con un coeficiente de correlación de Pearson de  $r = 0,95$ .

Alarcon et al. (2010), determinó que los ecosistemas poseen una estructura que depende de la interacción de los factores bióticos y abióticos, caracterizado por

procesos cíclico dinámico que definen su funcionamiento, también indica que en algunos el grado de transformación por acción antrópica es extremo, como en los sectores de Guacamayo y Lamal del Distrito de Inambari-Madre de Dios; en otras partes, el impacto ambiental producido, por el cambio de uso de la tierra ha sido drástico, que será muy difícil retrotraerse a situaciones prístinas, esta investigación se realizó al sur oeste de la ciudad de Puerto Maldonado-Perú, corresponde a los cambios producidos en el paisaje del bosque natural, mediante la aplicación de análisis multitemporal con imágenes Landsat/TM (2000- 2009), a las que aplicó técnicas digitales de clasificación temática y álgebra de bandas (NDVI). Los resultados obtenidos en la investigación demostraron una disminución considerable de la superficie ocupada por bosque, producto del avance de la minería aluvial informal y por la ampliación de la frontera agropecuaria, actividades que continuarán creciendo, si no se implementan mecanismos que permitan controlar estos cambios.

## **2.2 Marco referencial**

### **2.2.1 El Espectro Electromagnético:**

El flujo de energía necesario entre el sensor y el objeto observado, en un sistema de teledetección, constituye una forma de radiación electromagnética (Chuvieco 1996; Jensen 1996)

Esta energía electromagnética es una forma dinámica de energía que es causada por la oscilación o aceleración de una carga eléctrica, de este modo, todas las sustancias naturales o sintéticas continuamente producen o emiten un rango de energía electromagnética en proporción a su temperatura (Avery 1992).

Toda energía térmica puede ser transferida mediante tres procesos: convección, conducción y radiación, siendo esta última la base de la mayoría de los sistemas de teledetección (Chuvieco 1996). Así, la radiación es el método por el cual la energía puede ser transferida desde un cuerpo a otro en ausencia de algún material intermediario. Si esta intervención se hace presente, debe ser lo suficientemente transparente de modo de que la energía sea transferida. La

radiación es el único método por el cual la energía solar puede recorrer millones de kilómetros a través del espacio y alcanzar la tierra. Este es el método de transferencia de energía con el cual se concibe un sensor remoto (Avery 1992).

Las propiedades de la radiación electromagnéticas han sido explicadas por dos teorías: la teoría ondulatoria que la crea como un haz ondulatorio, y la teoría cuántica que considera la radiación electromagnética como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero. Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas, uno eléctrico y otro magnético, descritos por la longitud de onda y su frecuencia, de este modo cualquier forma de energía radiante puede ser descrita en función de estos dos elementos (Chuvienco 1996; 2010; Jensen 1996).

La teoría cuántica permite calcular la cantidad de energía transportada por un fotón, siempre que se conozca su frecuencia, de tal forma que, a mayor longitud de onda, o menor frecuencia, el contenido energético será menor y viceversa, de este modo la radiación en longitudes de onda largas es más difíciles de detectar que aquellas centradas en longitudes cortas (Chuvienco 1996; 2010; Jensen 1996).

Cada una de las teorías, señaladas anteriormente, describe a la radiación electromagnética en función de su longitud de onda o frecuencia, de tal modo que la sucesión de valores permite establecer una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar, siendo la organización de estas bandas lo que conocemos como espectro electromagnético (Chuvienco 1996; 2010; Jensen 1996).

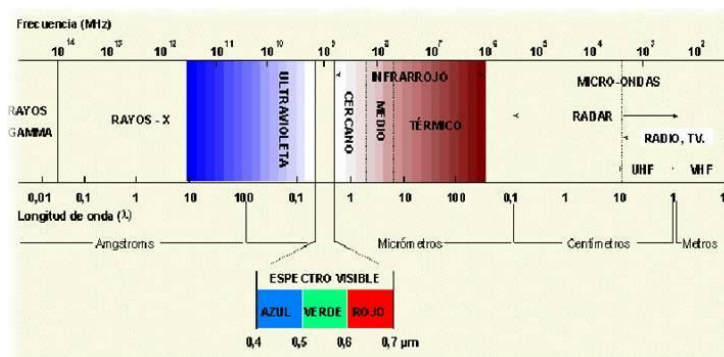


Figura 1. Espectro Electromagnético

Fuente: Chuvieco (2010).

Las características espectrales que presentan las distintas superficies terrestres, que son motivo de investigación por distintas disciplinas, permiten reconocer ciertas bandas del espectro electromagnético que son las comúnmente utilizadas por las actuales aplicaciones de las técnicas de teledetección y que entregan las principales plataformas satelitales (Medina 2001).

### 2.2.2 Fundamentos Físicos de la Teledetección:

Como se nombró anteriormente, en cualquier sistema de teledetección deben existir los siguientes elementos: sensor, objeto y flujo energético, el cual es el responsable de la interacción entre los objetos, este mismo puede ser emitido ya sea por el objeto, el sensor u otra fuente externa como el sol, estas son las tres formas de adquirir información mediante los sensores remotos: por reflexión, por emisión y por emisión- reflexión (Chuvieco 1996; Rodriguez y Arredondo 2005; De la Mora 2011).

En cualquiera de los casos, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor remoto constituye una forma de radiación electromagnética, este

fenómeno de radiación es el que principalmente interactúa en los procesos de teledetección, científicamente este fenómeno se ha descrito desde dos teorías contrapuestas una, determinada como una haz ondulatorio (Hyugens, Maxwell), y la otra concebida como una sucesión de unidades discretas de energía (fotones o cuantos), con masa igual a cero (Planck, Einstein), se podría decir actualmente que las dos teorías se complementan gracias a que según la física, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro con la trayectoria de un modelo armónico, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético, este flujo es descrito mediante dos componentes  $\lambda$  como longitud de onda (la cual hace referencia a la distancia entre picos sucesivos) y  $F$  como la frecuencia (la cual hace referencia al número de ciclos en punto fijo por unidad de tiempo) (Chuvieco 1996; Rodriguez y Arredondo 2005; De la Mora 2011).

$$c = \lambda \cdot F \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde “c” indica la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ),  $\lambda$  expresa la longitud de onda y  $F$  la frecuencia (Herzios, ciclos por segundo). En definitiva, a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa, por lo que basta con indicar un solo termino para identificar propiamente el tipo de energía mencionado.

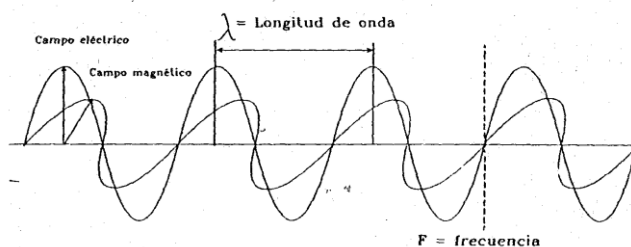


Figura 2: Esquema de una onda magnética

Fuente: Chuvieco (1996)

Mediante la teoría cuántica, se puede calcular la cantidad de energía que es transportada por un fotón, siempre que se conozca su frecuencia:

$$Q=h.F$$

Ecuación 2

Donde Q es la energía radiante de un fotón (en julios), F la frecuencia y h es la constante de Planck ( $6,6 \times 10^{-34}$  j/s), según la anterior ecuación, se deduce que, a mayor longitud de onda, es más difícil de detectar la información que aquella ubicada en longitudes cortas (Chuvieco 1996; Rodriguez y Arredondo 2005; De la Mora 2011).

La radiación que detecta los sensores de los satélites meteorológicos, proviene de tres principales: el sol, la tierra y la atmosfera. La radiación electromagnética incidente de origen solar es afectada por la atmosfera a través de los procesos de transmisión, absorción, "scattering" o difusión, y reflexión (Rodriguez y Arredondo 2005)

La radiación de onda corta que es emitida por el sol alcanza la atmosfera. Parte de ella es absorbida por los gases que lo componen. Otra parte, muy importante, es reflejada por las nubes, la tierra, el agua y es reenviada de nuevo al espacio. La radiación transmitida llega a los diferentes niveles de la atmosfera y a la superficie de la tierra. Estos sistemas se calientan y a su vez actúan como fuentes emisoras, pero como elementos de radiación electromagnética de onda larga. De nuevo los procesos de emisión, absorción, dispersión y transmisión aparecen ligados a la radiación térmica que se dirige al espacio y se ve interrumpida y alterada por los componentes atmosféricos (Rodriguez y Arredondo 2005; Mendoza 2012)

Los sensores de satélites miden la energía radiante proveniente de las distintas fuentes emisoras que ha sufrido una serie de proceso en el sistema tierra-atmosfera. Las principales fuentes de emisión son la superficie de la tierra, las nubes, la propia atmosfera y las zonas acuosas (mares, océanos, lagos, ríos, etc.) (Rodriguez y Arredondo 2005; Mendoza 2012).



Figura 3: Comportamiento de la radiación electromagnética en la tierra.

Fuente: Rodríguez y Arredondo (2005).

### 2.2.3 Principios generales de la teledetección:

En el mundo siempre ha existido la necesidad de identificar el espacio que nos rodea, desde hace unos siglos surgieron ciencias empíricas dedicadas a la interpretación geográfica, entre las cuales tenemos la topografía y fotogrametría, así mismo la meteorología para el estudio climatológico, hasta hace poco tiempo las metodologías aplicadas no eran muy tecnificadas, los datos solo se obtenían a partir de un trabajo de campo y era necesario llevar equipos considerables al área de estudio para el desarrollo de la investigación, esto implicaba condiciones desfavorables en algunos lugares en los que la accesibilidad no es posible (Rodriguez y Arredondo 2005).

Con el desarrollo de la tecnología computacional, la ciencia está avanzando hacia un nivel con posibilidades ilimitadas de conocimiento, la obtención de información en algunos campos de la investigación actualmente no requiere la presencia

física del hombre, equipos como los satélites demuestran la capacidad humana para desarrollar tecnologías alternativas de solución a problemas en los que existían limitaciones técnicas, la aplicación en procesos de datos actualmente resulta ser una tarea sencilla en la que manejar múltiples variables no es un obstáculo en el momento de obtener resultados instantáneos (Rodríguez y Arredondo 2005; De la Mora 2011).

La teledetección es una técnica dependiente de su desarrollo a través del tiempo, sus formas de presentación han variado en las últimas décadas de una manera progresiva. Los primeros pasos en la teledetección dieron a lugar cuando Gaspar Félix obtuvo las primeras fotografías aéreas desde un globo en 1859, en los años siguientes se presenta un trascendental desarrollo de la observación fotográfica desde avión, es en 1909 cuando Wilbur Wight adquiere la primera fotografía aérea. La primera cámara aérea fue desarrollada en 1915 por J.T.C. Moore, de allí inicia el interesante camino de avance en las técnicas de fotografía aérea. Es en la segunda guerra mundial cuando el progreso tiende a desarrollar las cámaras de reconocimiento, así mismo surgen nuevos sensores como el radar y los sistemas de comunicación. Estas innovaciones encuentran su principal aplicación en la exploración y control de los recursos naturales (Rodríguez y Arredondo 2005).

La literatura ofrece gran variedad de definiciones para los sensores remotos, una de las más acertadas es la concebida por Richie and Rango 1996 "los sensores remotos han sido definidos como la ciencia y el arte de obtener información acerca de un objeto, área o fenómeno a través de análisis adquiridos de datos por sensores que no están en contacto directo con el objetivo de investigación". Son reconocidas las ventajas ofrecidas por los sensores remotos comparados con los datos obtenidos convencionalmente, pero existen algunas desventajas y es que muchos de estos parámetros no serán posibles de medir directamente, debido a la adquisición de datos del espectro electromagnético (Rodríguez y Arredondo 2005; De la Mora 2011).



En definitiva, un sistema de teledetección espacial está constituido por los siguientes elementos:

Fuente de energía, supone un creador de la energía que el sensor está detectando, puede tratarse de un actor externo en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o si es emitida por el sensor se habla de teledetección activa, la fuente más importante de energía es el sol.

Cubierta Terrestre, formada por la vegetación, agua, construcciones, suelo, las cuales reflejan la energía generada por la fuente, cada una dependiendo de sus características propias.

Sistema Sensor, compuesto por el sensor en sí, y la plataforma que lo conforma. Tiene el trabajo de captar la energía procedente de la cubierta terrestre y enviarla al centro o base de recepción.

Sistema de recepción-comercialización, donde se recibe la información enviada por el sensor, se graba en un formato adecuado y luego se distribuye a los usuarios.

Interprete, es el encargado de analizar la información, comúnmente en forma de imágenes digitales para determinar su clave temática para la solución de la situación en estudio.

Usuario final, es el encargado de analizar el documento fruto de la interpretación anterior.

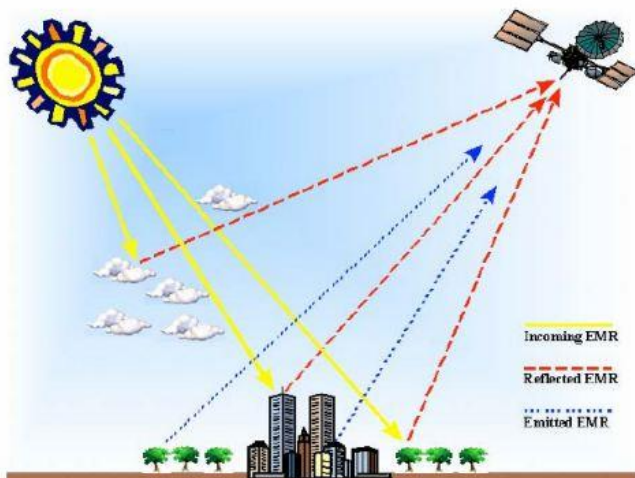


Figura 4. Concepto de sensor remoto.

Fuente: Rodríguez y Arredondo (2005).

Las principales aplicaciones de la teledetección son (Chuvienco 1996): Las principales aportaciones de esta técnica a diversas ciencias del medio ambiente, la siguiente relación se extrae de la bibliografía disponible; se trata de temas en los que la teledetección ya ha demostrado su aplicabilidad:

- Estudio de erosión de playas y arenales
- Inventario regional del medio ambiente para preparar estudios de impactos ambientales
- Cartografía geológica para la exploración petrolífera.
- Cartografía de nuevos depósitos volcánicos.
- Control de la acumulación nival, de la fusión y de los cambios previsibles de la energía hidroeléctrica.
- Control del movimiento de Iceberg en zonas polares.
- Estimación de modelos de escorrentía y erosión.
- Inventarios del agua superficial.
- Análisis en tiempo real de masas nubosas de escala media y pequeña.

- Medidas de aguas superficiales y humedales para evaluar la situación del hábitat para aves acuáticas.
- Verificación de contenidos de salinidad en las corrientes de agua.
- Cartografía térmica de la superficie del mar.
- Verificación y control de la calidad física del agua, turbidez y contenido de algas.
- Control de movimientos de Gulf Stream y otras zonas marinas.
- Cartografía de la cobertura vegetal del suelo.
- Rápida evaluación de condiciones de estrés en la vegetación, por efectos de la sequía o la erosión.
- Cartografía de áreas quemadas y seguimiento de los ritmos de repoblación natural.
- Contribución a la cartografía e inventario de la cobertura y uso del suelo.
- Realización de inventarios forestales.
- Realización de rutas óptimas para las nuevas vías de comunicación.
- Control de pastizales.
- Cartografía en inventario de cultivos por especie.
- Previsión del rendimiento de cultivos.

Durante los últimos años con el avance de tecnologías encargadas de facilitar la comprensión acerca de las propiedades y comportamiento de la naturaleza. Una de las técnicas mejor desarrolladas en los últimos años ha sido la obtención de imágenes de la tierra desde sensores incluidos sobre satélites que giran alrededor del planeta, proceso conocido como la teledetección.

La teledetección es un conjunto de conocimientos y técnicas utilizados para determinar características físicas y biológicas de objetos a través de datos adquiridos por un sensor que no está en contacto directo con el objeto de investigación (Schultz & Engman), estos sensores remotos son dispositivos que pueden captar la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la tierra, usan mediciones del espectro electromagnético con el fin de

caracterizar el paisaje. Con el avance de la ciencia se ha logrado del espectro electromagnético ampliar el rango de obtención de información, así, por ejemplo, actualmente encontramos sensores remotos de tipo térmico (obtención de temperatura terrestre) y medidores de microondas (lecturas de humedad local) (Rodríguez y Arredondo 2005).

Desde unos años atrás se cuenta con dos sensores en los satélites Landsat para adquirir imágenes; el MSS (multiespectral scanner) que ofrece información sobre cuatro bandas del espectro, el TM (Thematic Mapper) que ofrece siete bandas del espectro y el satélite francés SPOT que permite dos modalidades de observación: multibanda de 3 canales con resolución de 20X20m y pancromático con una resolución de 10X10m (Rodríguez y Arredondo 2005).



*Figura 5.* Satélite Landsat.

Fuente: (Rodríguez y Arredondo 2005).

Al tener definida la teledetección espacial, como aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, se supone una interacción energética entre la tierra y el sensor remoto ya sea por reflexión de la energía solar o un haz de energía

artificial, a su vez es importante que la recepción del sensor sea transmitida a la tierra con el fin de encontrarle aplicación (Rodríguez y Arredondo 2005).

En definitiva, los sensores de observación terrestre, permiten distinguir varias escalas, desde la local hasta la global. Se trata de una nueva forma de visualizar los fenómenos cotidianos para los habitantes del planeta, este conocimiento ha permitido en ingeniería forestal realizar estudios de gran alcance investigativo (Rodríguez y Arredondo 2005).

El proceso de la teledetección permite disponer de datos acerca del territorio, algunos en tiempo real por lo que utilizar esta herramienta resulta ser inevitable. Luego del entrenamiento adecuado, esta tecnología amplía la capacidad de análisis del problema bajo estudio, gracias a esto, en la actualidad se enfatiza en el planteamiento de modelos y estudio de sus resultados, trabajos inherentes al investigador (Rodríguez y Arredondo 2005; De la Mora 2011).

La información obtenida es de gran valor porque en la actualidad, mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG) disponibles en el mercado, algunos de libre distribución, se procesa y manejan las diferentes variables obtenidas de los sensores remotos y en el contexto forestal se reconoce la calidad de los productos obtenidos de sensores remotos tales como fotografías aéreas, imágenes satelitales y de radar, entre otros (Rodríguez y Arredondo 2005; De la Mora 2011).

Actualmente la obtención y análisis de información del medio ambiente tiende a utilizar herramientas computacionales, los países desarrollados en general adquieren información digital de los satélites, esta es interpretada en sistemas de información geográfica, diseñados para su procesamiento mediante la modelación operacional- temporal. La necesidad de solucionar problemas de mayor complejidad y manejar eficientemente la información, ha convertido la complementariedad entre los SIG y sensores remotos en instrumentos vitales para el análisis, planeamiento y administración de los recursos naturales (Rodríguez y Arredondo 2005; De la Mora 2011).

#### **2.2.4 El Programa LANDSAT**

A mediados de 1960, la idea de un satélite civil de recursos terrestre fue concebida por el departamento del interior de los Estados Unidos. Luego la National Aeronautics and Space Administration (NASA) se inició el desarrollo y lanzamiento del primer satélite de monitoreo terrestre para enfrentar las necesidades del manejo de los recursos y de los científicos del mundo.

A principios de 1970 el U.S. Geological Survey (USGS) entró en sociedad con la NASA para asumir la responsabilidad de almacenar los datos y la distribución de los productos obtenidos. El 23 de julio de 1972 la NASA lanzó el primero de una serie de satélites destinados a proporcionar repetitivas coberturas globales de las masas de suelo terrestre. La denominación inicial fue el "Earth Resources Technology Satellite-A", que al momento de ser lanzado se llamó "ERTS-1", concebido para un año de operaciones y que finalmente terminó sus funciones en enero de 1978. Luego, este satélite pasó a llamarse Landsat 1 (BELSPO 1999; Rodriguez y Arredondo 2005; De la Mora 2011; Mendoza 2012).

El programa Landsat es actualmente administrado por la NASA (National Aeronautics and Space Administration), por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y por la USGS (United States Geological Survey). Este programa empezó sus investigaciones experimentales sobre los recursos naturales terrestres en 1962 con la contribución de algunas agencias federales de los Estados Unidos con el nombre de Programa Satelital ERTS (Earth Resource Technology Satellite). El éxito del programa se debe a factores como la combinación de sensores con bandas espectrales destinadas a la observación de la tierra, resolución espacial funcional y su gran cobertura en orbitas casi polares sincronizadas con el sol (Chuvienco 2010; Rodriguez y Arredondo 2005).

Con el lanzamiento del Landsat 1 el 07-03-1972 se abrió una nueva percepción del planeta con una resolución tanto temporal como espectral desconocida hasta entonces. Este satélite, dotado de sensores empleados en teledetección, fue diseñado con el fin de obtener datos de los recursos terrestres, En base a este

objetivo se diseñaron las resoluciones para adaptarse a este fin. La serie de satélites Landsat, Landsat 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, desde el año 1972 dan una de las mejores series históricas de la evolución del planeta (Fernández y Herrero 2001).

Sobre los sensores colocados a bordo, las cámaras RBV se enviaron hasta el Landsat 3 y el MSS hasta el Landsat 5, pero a partir del Landsat 4 en 1982 se instalaron mapeadores temáticos (TM) que fueron la evolución de los exploradores multiespectrales debido a una mayor resolución espacial, 30 m para todas la bandas menos para el IR termal, y radiométrica; siete bandas espectrales más estrechas y un incremento en el número de detectores por banda (16 canales no termales en comparación de los 6 del MSS). El satélite Landsat 6 se diferencia de los demás porque en él se hallaba el mapeador temático mejorado (ETM) cuyo objetivo era el de proveer de una amplia gama de datos como el monitoreo del medio ambiente, exploración de recursos naturales, planeación urbana y cartografía, pero la nave perdió contacto con la base en tierra poco tiempo después del lanzamiento y antes de entrar en órbita (Chuvienco 2010).

La Misión Landsat 7, continúa con la observación global comenzaba en 1972 administrada por la NASA, NOAA y USGS bajo el Acta de 1992 sobre Sensores Remotos Terrestres capturando imágenes de alta resolución de la superficie terrestre para el monitoreo ambiental, desastres, uso del suelo y planeación regional, cartografía y exploración mineral y petrolera. Landsat 7 tiene el mapeador temático más mejorado (ETM+) versión perfeccionada del ETM del Landsat 6 con una resolución espacial más avanzada construida por Lockheed Martin Missiles and Space (Chuvienco 2010; Mendoza 2012). A continuación, se describen las principales bandas espectrales descritas por los sensores remotos con sus respectivas aplicaciones.

Tabla 2. *Aplicaciones de las diferentes bandas espectrales*

<b>Banda espectral</b>	<b>Aplicaciones</b>
Azul (0.45-0.5 $\mu\text{m}$ )	Penetración del agua, uso de la tierra, características de la vegetación, sedimentos.
Verde (0.5-0.6 $\mu\text{m}$ )	Reflexión verde de la vegetación sana.
Rojo (0.6-0.7 $\mu\text{m}$ )	Discriminación de la vegetación por la absorción de la clorofila.
Pancromático (0.5-0.75)	Trazado del uso de la tierra.
Infrarrojo reflectivo (1.5-1.75)	Biomasa, identificación de cultivos, límites de la tierra y agua.
Infrarrojo medio (1.5-1.75)	Cantidad vegetación, zonas áridas, nubosidad, hielo, nieve.
Infrarrojo medio (2-2.35)	Geología, formación de rocas.
Infrarrojo térmico (10-12.5)	Diferenciación temperatura, descargas térmicas, clasificación de la vegetación, inercia térmica.
Microonda de onda corta (0.1-5cm)	Cubrimiento de la nieve, profundidades, contenido de agua en la vegetación.
Microonda de onda larga (5-24cm)	Medidas del suelo, límites entre tierra y agua, penetración de la vegetación

Fuente: Chuvieco (1996).

Además de todo lo anterior los sensores remotos también presentan una resolución temporal, esto varía también de acuerdo al tipo de sensor remoto, de la base en la tierra y el sistema de radares, puede ser en cuestión de minutos, horas o días en las que se obtiene la información procedente del sensor remoto.

### **2.2.6 CHIRPS**

CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations), que en español se traduce como “Detección de amenazas climáticas mediante el monitoreo de precipitación satelital”, es un conjunto de datos desarrollado por el Servicio Geológico de EEUU (U.S. Geological Survey, USGS) y el CHG (Climate Hazards Group) de la Universidad de California, Santa Bárbara. CHIRPS utiliza un procedimiento de estimación de precipitación bajo el enfoque de “interpolación



inteligente” para crear una grilla espacialmente continua desde datos de puntos sin procesar (Funk et al. 2014). Los datos de entrada que utiliza el CHIRPS son:

- Las climatologías de precipitación mensual (CHPclim)
- Observaciones satelitales de sensores IR GEO proporcionados por dos fuentes de la NASA, el centro de Predicción Climática (CPC) y el Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC).
- Datos de precipitaciones estimadas por el modelo atmosférico del sistema de pronósticos climáticos de la NOAA, versión 2, (CFSv2).
- Datos observados en superficie proporcionados por varios servicios meteorológicos nacionales y regionales (Funk et al. 2014).

Tabla 3. *Datos de entrada del algoritmo CHIRPS*

<b>Tipo</b>	<b>Acrónimo</b>	<b>Nombre completo</b>	<b>Agencia</b>
Sensor satelital	GERO-IR	Imágenes Infrarrojos proporcionadas por los satélites Geoestacionarios	NASA
Algoritmo de recuperación satelital	TRMM 3B42	Misión para medir precipitación tropical en forma de lluvia producto de precipitación 3B42	NASA y JAXA
Climatologías de precipitación	CHPClim	Climate Hazard Group's Precipitation Climatology	USGS
Estimaciones de modelos atmosféricos	CFSv2	Sistema de pronósticos climáticos, versión 2	NOAA
Datos de pluviómetros			Varias fuentes

Fuente: (Méndez 2016).

Tabla 4. Características de los datos de precipitación CHIRPS

Acrónimo	Nombre Completo	Resolución y cobertura espacial	Resolución y cobertura temporal	Formato de datos
CHIRPS	Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations 2 días	0.05° 50N-50S	24 h 1981 a la fecha	NetCDF

Fuente: (Méndez 2016).

### 2.2.7 Análisis Visual de Imágenes RGB para imágenes Landsat

El análisis visual de imágenes se realiza empleando tres bandas del sensor, coincidiendo con la capacidad de los monitores, empleados en informática, monitores RGB. Los monitores poseen un total de tres cañones, RGB (Red, Green, Blue. Rojo, Verde, Azul respectivamente), con los que, por combinación de estos tres colores básicos, se construyen el resto de los colores (Fernández y Herrero 2001).

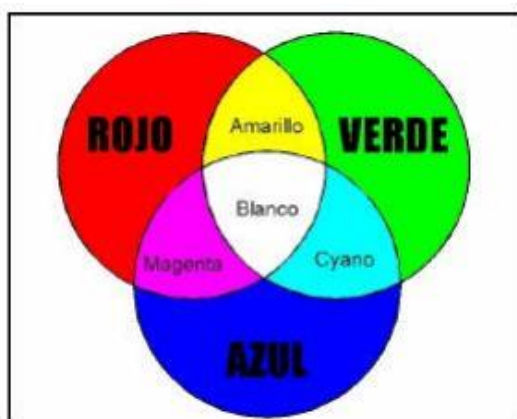


Figura 6. Combinación de Colores RGB

Fuente: Fernández y Herrero (2001).

## **2.2.8 Tratamiento Digital De Imágenes Satelitales**

Antes de comenzar cualquier análisis sobre la información recogida desde un sensor remoto es necesario un tratamiento previo de los datos en cuestión. Este proceso se conoce en la literatura como “Image Preprocessing” y está destinado a corregir los errores derivados del proceso de adquisición de la información y que puede degradar la calidad de los datos recogidos por el sensor (Jensen 1996).

Cuando la detección de cambios se realiza comparando, píxel a píxel, los Niveles Digitales (ND) de las distintas imágenes es necesario eliminar previamente cualquier cambio en los ND de la escena que no sea debido a cambios reales en la cubierta. Esto implica ajustar con precisión, tanto radiométrica, como geoméricamente, las imágenes que intervienen en el análisis (Chuvieco 1996).

### **2.2.8.1 Corrección Geométrica**

Constantemente la información obtenida de sensores remotos presenta errores geoméricos de origen sistemático, aquellos que pueden ser corregidos utilizando la información desde la plataforma y conociendo la distorsión interna del sensor, y no sistemático, aquellos que no pueden ser corregidos con una precisión aceptable sin un número suficiente de puntos de control terrestre. Entre las causas de errores geoméricos de origen sistemático se puede mencionar la velocidad de la plataforma y la rotación de la tierra. Por otro lado, las distorsiones de origen no sistemático incluyen los errores producto de la altitud y posición del sensor (Jensen 1996).

La mayoría de la información de sensores remotos comerciales entrega los datos con los errores sistemáticos previamente corregidos, permaneciendo los errores no sistemáticos en la imagen. Para corregir estos errores se puede recurrir a dos procedimientos comunes, estos son la rectificación imagen a imagen, y la rectificación imagen a mapa (Jensen 1996; Chuvieco 1996; Chuvieco 2010).

### **2.2.8.2 Calibración Radiométrica**

Idealmente, el flujo de radiación recogido por un sensor remoto, en varias bandas, es una representación precisa de las características de la superficie terrestre. Desafortunadamente esto no ocurre y pueden ingresar errores al sistema de colección de información de varias maneras. Por ejemplo, errores radiométricos en los datos percibidos pueden ser introducidos por el mismo sensor remoto cuando los detectores individuales no funcionan apropiadamente o son inapropiadamente calibrados (Jensen 1996). Por otro lado, la intervención atmosférica entre el terreno de interés y el sensor remoto pueden contribuir con tanto ruido (error) que la energía recibida por el sensor no se parece a lo que fue reflejado o emitido por el terreno (Jensen 1996; Chuvieco 1996; Chuvieco 2010).

Las variables condiciones de observación, situaciones atmosféricas o condiciones de calibración del sensor se convierten en otro importante problema en la detección digital de cambios, ya que la signatura espectral en un píxel se ve modificada, aunque se mantenga constante la cubierta (Chuvieco 1996; Chuvieco 2010).

La corrección radiométrica de una imagen satelital puede realizarse, entre otros, por dos métodos; la calibración absoluta y la calibración relativa.

#### **2.2.8.2.1 Calibración Absoluta**

La radiación solar es selectivamente difundida y absorbida al entrar en contacto con la atmósfera terrestre. La energía emanada desde el cielo y recibida por el sensor es un indicador verdadero aun cuando se destruya nuestra habilidad para medir la reflectancia espectral de los patrones del terreno. De hecho, los científicos pueden considerar a la difusión y absorción atmosférica de la energía como el verdadero indicador y a la energía reflejada desde la tierra como el origen del ruido o error. No obstante, muchos de los analistas de la tierra consideran nocivo el efecto de la difusión y absorción atmosférica como fuente de error que

puede minimizar la habilidad para extraer información útil del terreno desde datos obtenidos por sensores remotos (Jensen 1996).

La calibración absoluta considera aspectos de la transmisividad atmosférica, irradiancia difusa del cielo y ruta de la radiancia para así determinar como el efecto atmosférico afecta la radiansa medida por el sensor remoto (Jensen 1996; Chuvieco 1996; Chuvieco 2010).

#### **2.2.8.2.2 Calibración Relativa**

La corrección radiométrica relativa puede ser utilizada para normalizar las intensidades entre las diferentes bandas dentro de una escena (por ejemplo, para remover la respuesta errónea del sensor, líneas abandonadas o rayados) y, para normalizar las intensidades de las bandas de los datos de una de la imagen en una fecha y estandarizarla a la escena escogida en el análisis. La corrección radiométrica relativa generalmente no requiere reunir mediciones atmosféricas en el tiempo de adquisición de la información, que son muy difíciles de obtener cuando se utiliza información histórica de un sensor remoto (Jensen 1996).

#### **2.2.9 Índices de Vegetación**

Los índices de vegetación, o índices verdes, son transformaciones que implican efectuar una combinación matemática entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen (Speranza y Zerda 2002).

El desarrollo de estos índices obedeció a la observación de la consistencia de la respuesta a la reflectancia de la luz roja e infrarroja de la vegetación verde: a mayor cantidad de clorofila, mayor absorción de la luz incidente roja; a mayor volumen foliar, mayor reflectancia de la luz infrarroja cercana. Considerando que pueden existir otras coberturas con alta reflectancia en el infrarrojo, u otras con alta absorción en el rojo, el empleo de solo una banda puede conducir a errores. Sin embargo, solo la vegetación viva produce invariablemente ambas respuestas, de modo que, si se calcula el cociente de la reflectancia infrarroja por la roja, o su diferencia, como la primera siempre aumenta conforme la segunda disminuye,

el cociente (o diferencia) será mayor cuanto más vegetación haya, por el efecto aditivo que una mayor abundancia de vegetación produce (Towers 2002; Gonzaga 2014).

### **2.2.9.1 Composición y Aplicaciones**

La observación remota de las cubiertas vegetales puede apoyarse en el gran contraste cromático que presenta la vegetación vigorosa entre las distintas bandas del espectro, y singularmente entre la visible (alta absorción, baja reflectividad) y el NIR (baja absorción, alta reflectividad) como se aprecia en la figura 7. De ahí que podemos enunciar, como principio genérico, que cuanto mayor sea el contraste entre esas dos bandas, mayor será la cobertura vegetal y/o el vigor de la vegetación y más clara su discriminación frente a otros tipos de cobertura. Este comportamiento espectral teórico de las coberturas vegetales ha sido la base para obtener una serie de índices de vegetación, que se basan precisamente en el contraste entre las bandas R y NIR del espectro. Se construyen a partir de la combinación de esas dos bandas, cuando disponemos de una imagen multiespectral. Muy variados en su desarrollo, todos ellos tienden a presentar en forma más nítida las características de la vegetación, facilitando su aislamiento de otras coberturas y la detección de su estado vital (Bannari et al. 1995; Curran 1981; Myneni et al. 1997; Sellers 1989; Chuvieco 2008).

Los índices de vegetación se aplican en análisis cualitativos o cuantitativos. Empleados cualitativamente, permiten determinar rápidamente el estado relativo de la vegetación en una zona. Como una gran variedad de factores afecta directamente la producción de biomasa, los índices pueden emplearse para determinar la influencia de dichos factores en una zona o momento. Así, pueden usarse para determinar el efecto sobre la biomasa de sequías, anegamientos, incendios, desmontes, granizo, plagas, o deficiencias nutricionales (Towers 2002).

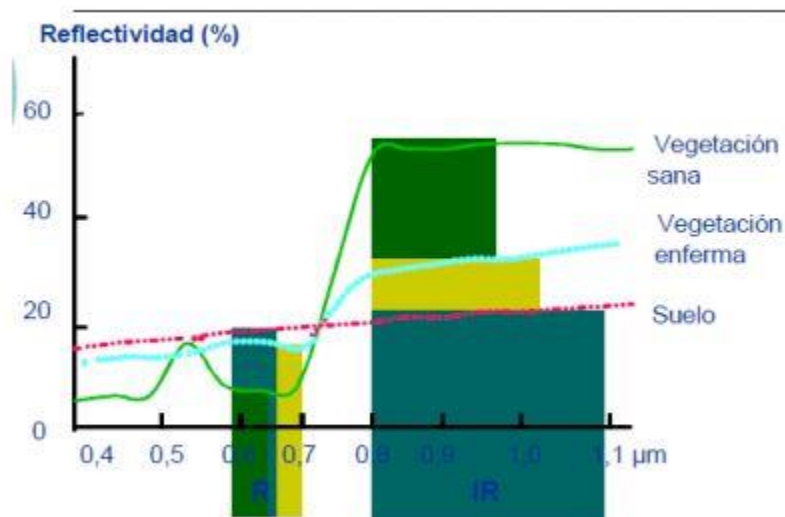


Figura 7. Comportamiento de los índices de vegetación sobre la reflectancia en diversas longitudes de onda.

Fuente: Gonzaga (2014).

### 2.2.9.2 Limitaciones de los índices de vegetación

El Índice de Vegetación Normalizado NDVI es el índice de vegetación más utilizado para la evaluación de la erosión del suelo. Sin embargo, el NDVI tiene algunos problemas en la estimación de la cubierta vegetal, por ejemplo, este índice comienza a saturar cuando la cubierta vegetal es superior al 50% (Gill et al. 2009), y no es sensible al verde cuando la cubierta vegetal es baja. Por este motivo puede sobre o subestimar la cubierta vegetal, dando información errónea en algunas zonas (Zhongming et al. 2010).

El problema de la iluminación: la compensación de los efectos atmosféricos no es perfecta con el NDVI, entre otras cosas porque los cambios atmosféricos no afectan todas las longitudes de onda de la misma manera. Por este motivo, se han desarrollado índices verdes que combinan los valores de reflectancia de modos no lineales, como ocurre en el Índice de Vegetación de Ambiente Global GEMI (Pinty y Verstraete 1992).

Existen éste y muchos otros intentos de corregir el problema de la iluminación, pero si bien frecuentemente mejoran la precisión, suelen presentar algunas complicaciones para el cálculo o, por ser relativamente poco empleados, se desconoce el grado de corrección que aportan en distintas situaciones. Sin embargo, en aplicaciones puntuales arrojan resultados más consistentes que los índices más comunes (Towers 2002).

El otro problema que se presenta con el uso de los índices verdes es la contaminación con respuestas espectrales provenientes del suelo cuando la cobertura no es alta. Si se está intentando evaluar de modo cuantitativo la información, y la respuesta del suelo presenta problemas, existen algunas salidas como emplear un índice verde corregido por el efecto del suelo, como el Índice de Vegetación Perpendicular PV (Richardson y Wiegand 1977), o el Índice de Vegetación Ajustado por Suelo Transformado TSAVI (Baret y Guyot 1991). En ambos casos se estudia la llamada “línea de suelo” y se determina la distancia perpendicular desde esta línea hasta el valor total de reflectancia en rojo y NIR. Efectivamente lo que se realiza es restar la reflectancia propia del suelo del valor total de reflectancia, y se presume que la diferencia se debe a la vegetación (Towers 2002).

Otra opción es, identificar sobre el terreno lotes con cobertura vegetal total y suelos desnudos, y se determina, para cada pixel, la proporción de cada respuesta que lo compone, es decir se separan la proporción de pixel cubierta por vegetación y la del suelo (desmezclado del pixel) (Gonzaga 2014).

Sin embargo, aún con coberturas parciales, es común que la contaminación por suelo sea menor de lo que se espera. Esto es así porque la inclinación solar, y el ángulo de observación, son tales que el suelo no se observa. Obviamente, si el sol iluminase desde el cenit, y también desde allí se realizará la teledetección, un cultivo con 70 % de cobertura devolvería un 70 % de respuesta proveniente de la vegetación y un 30 % proveniente del suelo. Pero la luz alcanza al cultivo en diagonal, y salvo con coberturas muy bajas, o surcos muy anchos, generalmente



interactúa con la vegetación antes de alcanzar el suelo. Es por este motivo que el NDVI no aumenta por encima de coberturas del orden del 80 % (Towers 2002).

### 2.2.10 Índice de vegetación mejorado (EVI)

El índice EVI (Huete 1999), con igual significado biológico (Glenn et al. 2008) al NDVI, pero cuyo cálculo incluye también la reflectancia en las longitudes de onda del azul (además del rojo y el infrarrojo cercano), supone una mejora sobre el NDVI, ya que considera el efecto de la atmósfera y la señal radiométrica bajo la cobertura vegetal (Liu y Huete 1995). En áreas con baja cobertura vegetal como el SE Ibérico, el índice EVI da valores algo menores que el NDVI, debido a la consideración en su fórmula de la reflectancia en las longitudes de onda azul. No obstante, en estos casos el EVI proporciona una medida más precisa del funcionamiento de los ecosistemas (Evrendilek y Gulbeyaz 2008).

$$EVI = G * \frac{NIR - VIS}{NIR + C1 * VIS - C2 * BLU + L} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde C1 y C2, son los coeficientes diseñados para corregir los efectos de la dispersión y absorción de los aerosoles, respectivamente. El valor de C1 se ha fijado en 6 y el de C2 en 7,5. G representa un factor de cambio igual a 2,5 y L corresponde a un ajuste de la señal antecedente del dosel de las plantas cuyo valor es 1. La banda (BLU) es usada para corregir la influencia de los aerosoles sobre la banda roja (Huete et al. 2002; Ferreira et al. 2004; Roberts, Keller y Soares 2003; Xiao et al. 2005).

### 2.2.11 Minería aurífera

La Minería Aurífera en el Departamento de Madre de Dios se desarrolla principalmente en las provincias de Manu y Tambopata, correspondiendo, de acuerdo a la Ley 27651, Ley de formalización y Promoción de la Pequeña Minería y Minería Artesanal y su Reglamento el Decreto Supremo N° 013-2002-EM, a los estratos de pequeña minería y minería artesanal (Baca 2013; Pacheco 2014).

Debido a los altos precios del oro, la minería aurífera en suelos aluviales se está expandiendo en los últimos años precipitadamente que en cualquier época histórica, con enormes costos para la salud humana y para el ambiente. En Perú la llamada "minería artesanal" o "pequeña minería" son particularmente importantes en la Región Madre de Dios (Baca 2013; Pacheco 2014).

Los principales impactos de esta actividad son la contaminación ambiental, disturbación de suelos y deforestación. Contaminación generada por el uso de Mercurio dentro del proceso de recuperación del oro metálico y por el vertimiento de sólidos en suspensión en determinados cursos de agua, y vertimiento de los residuos de amalgamación al medio ambiente (cursos de agua y terrenos superficiales), originada por los métodos de explotación utilizados sin criterio técnico y sin aplicación de técnicas tendientes a su recomposición (Baca 2013; Pacheco 2014).

### **2.2.12 Regeneración natural**

(Clark 1987) considera que la regeneración natural es todo un proceso se puede considerar como el agregado de procesos mediante el cual el bosque se restablece por medios naturales, teniendo un aspecto dinámico y otro estático. La regeneración natural de los bosques tropicales está influenciada por muchos factores, estableciéndose dos grandes grupos: factores ambientales y factores intrínsecos. Los ambientales se refieren a luz, agua, suelo y factores bióticos. Los factores intrínsecos se refiere a los que tienen que ver con la especie, como estructura de la población, abundancia, crecimiento y fenología (Camelo 2015; FAO 2010; Bravo, Ordoñez y Velozo 2015; Hernández, Gagnon y Davidson 2015; Sajami 2017).

En los estudios de regeneración natural, se han establecidos categorías de tamaños, muchos de los cuales están influenciado por el tipo de investigación que se desarrolla. Sin embargo, las categorías más empleadas, designan la regeneración natural, como la masa que se ubica por debajo de 10 cm de

diámetro. Las categorías más usadas dividen la regeneración son (FAO 2010; Camelo 2015).

Compartimiento B, se refiere a la masa comprendida entre 1,3 m de altura y 9,9 cm de diámetro (d).

Compartimiento C, se refiere a la masa comprendida entre 0,3 m y 1,3 m de altura.

Otras clasificaciones establecen categorías de tamaño de la regeneración como: Latizal y Brinzal, donde latizal se refiere al comportamiento B y brinzal al comportamiento C.

### **2.2.13 Especies pioneras**

Los conceptos de "especie pionera" y "serial" y "tardía" fueron creados a principios del pasado siglo para hacer referencia a las especies dominantes en las etapas iniciales, intermedias y finales de la sucesión, respectivamente (Clements 1916), y han sido muy utilizados.

### **2.2.14 Índice de Kappa**

Es una medida de la exactitud de la clasificación y su varianza es usada, en la comunidad de teledetección, para realizar pruebas estadísticas de diferencias significativas. El índice de kappa refleja la concordancia inter-observador y puede ser calculado en tablas de cualquier dimensión, siempre y cuando se contrasten dos observadores.

El coeficiente kappa (K) toma valores entre -1 y +1; mientras más cercano a +1, mayor es el grado de concordancia inter-observador. Por el contrario, un valor de  $K=0$  refleja que la concordancia observada es precisamente la que se espera a causa exclusivamente del azar. La interpretación del coeficiente kappa se realiza correlacionando su valor con una escala cualitativa que incluye seis niveles de fuerza de concordancia ("pobre", "leve", "aceptable", "moderada", "considerable" y "casi perfecta"), simplificando la comprensión del mismo (Landis y Koch 1977).

Tabla 5. *Valoración del coeficiente de Kappa*

Coeficiente Kappa	Fuerza de la concordancia
0.00	Pobre (Poor)
0.01 - 0.20	Leve (Slight)
0.21 - 0.40	Aceptable (Fair)
0.41 - 0.60	Moderada (Moderate)
0.61 - 0.80	Considerable (Substantial)
0.81 - 1.00	Casi perfecta (Almost perfect)

Fuente: (Landis y Koch 1977).

### 2.3 Definición de términos

**Índice de Vegetación Mejorado (EVI):** El EVI, provee información que permite monitorear el estado de la vegetación de forma continua, fue optimizado a partir del NDVI para reducir la influencia de la atmósfera, por ejemplo, por la dispersión de aerosol. Por lo tanto, este índice es más apropiado para zonas con escasa cobertura vegetal y fuerte efecto del suelo desnudo y no presenta problemas de saturación como el NDVI en zonas con altas densidades de biomasa (SNIA 2018).

**Precipitación:** es cualquier forma de hidrometeoro que cae del cielo y llega a la superficie terrestre. Este fenómeno incluye lluvia, llovizna, nieve, aguanieve, granizo, pero no la virga, neblina ni rocío que son formas de condensación y no de precipitación (Méndez 2016).

**Firma espectral:** Curva que representa la variación de la reflectancia de un objeto en función de la longitud de onda (Labrador, Evora y Arbelo 2012).

**Imagen multiespectral (MS):** Imagen captada mediante un sensor que mide la energía simultáneamente en dos o más bandas espectrales (Labrador, Evora y Arbelo 2012).

**Píxel:** Cada uno de los elementos que componen una imagen, dispuestos matricialmente en filas y columnas (Labrador, Evora y Arbelo 2012).

**Puntos de control:** Puntos del terreno de coordenadas conocidas que pueden ser localizados en una imagen y que por lo tanto se pueden utilizar como apoyo en los procesos de georreferenciación y ortorrectificación de una imagen (Labrador, Evora y Arbelo 2012).

**Satélite de teledetección:** Plataforma espacial en órbita alrededor de la Tierra que lleva a bordo sensores para su observación (Labrador, Evora y Arbelo 2012).

**Sensor:** Instrumento que detecta radiación electromagnética y es capaz de convertirla en valores digitales para formar normalmente una imagen (Labrador, Evora y Arbelo 2012).

**Estadios Sucesionales:** También conocida como sucesión ecológica o natural a la evolución que de manera natural se produce en un ecosistema por su propia dinámica interna, el término alude a que su aspecto esencial es la sustitución en un ecosistema de unas especies por otras (Murillo 2009).

## **CAPITULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION**

### **3.1 Tipo de estudio**

El presente trabajo de investigación es del tipo Descriptivo Correlacional y Predictivo.

Tipo Correlacional, porque " Tiene como finalidad establecer el grado de relación o asociación entre dos o más variables, se caracterizan porque primero se miden las variables y luego, mediante pruebas de hipótesis correlacionales y la aplicación de técnicas estadísticas, se logra estimar la correlación".

Tipo Descriptivo, también conocida como la Investigación Estadística, se describen los datos y características de la población o fenómeno en estudio.

Tipo Predictivo, porque tiene como propósito pronosticar o prever situaciones futuras, consiste en predecir situaciones futuras, a partir de estudios exhaustivos de la evolución dinámica de los eventos, de su interrelación con el contexto, de las fuerzas volitivas de los actores que intervienen, y del estudio de las probabilidades de que algunos de esos eventos pudieran presentarse (Marroquin 2012).

### **3.2 Diseño del estudio**

La investigación se enmarca dentro del diseño de estudios analíticos observacionales no experimentales.

La investigación se considera no experimental porque no se tendrá control directo de las variables independientes, debido a que sus manifestaciones ya han ocurrido, se realizaran inferencias sobre las relaciones entre las variables, sin

intervención directa sobre la variación simultánea de las variables independiente y dependiente, se basará fundamentalmente en la observación de los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural para después analizarlos (Kerlinger 2002).

### **3.3 Población y muestra**

#### **Población**

La población está determinada por la zona de influencia del corredor minero de Madre De Dios la cual cuenta con 1 122 concesionarios, donde cada cuadrícula consta de 100 ha la cuales están en algunos casos superpuestos, dando 647 758,1 ha, (6 477,58 km<sup>2</sup>) que representa todo el corredor minero de Madre de Dios.

#### **Muestra**

La muestra se determinó en función a las zonas de mayor antigüedad en el corredor minero de Madre de Dios, siendo Huepetuhe, Delta y Dos de Mayo las zonas donde se trabaja minería desde la década de 1980 aproximadamente (OCMAL 2012), y la zona de La Pampa como una de las zonas donde está en constante variación la cobertura vegetal.

Cada zona consta de 10 000 ha sumado en las 4 zonas a estudiar 40 000 ha que fueron elegidas en función a la antigüedad y el tipo de extracción que se realiza en cada una de ellas, siendo Huepetuhe y Dos de Mayo lugares donde se realiza minería mediante maquinarias pesadas, mientras que Delta y La Pampa son lugares donde realiza actividad minera mediante bombas de succión (chupaderas).



### 3.4 Métodos y técnicas

#### 3.4.1 Lugar de estudio

Las zonas de estudio se encuentran distribuidos en los distritos de Madre de Dios, Huepetuhe e Inambari dentro de la Provincia del Manu.

Las zonas de estudio se encuentran dentro del corredor minero del departamento de Madre de Dios en la cual se realizan 2 tipos de extracción; Huepetuhe y Dos de Mayo realizan método de extracción con maquinaria pesada y en las zonas de La Pampa y Delta se realiza por métodos de bombas de succión.

Tabla 6. *Ubicación Política*

<b>PROVINCIA</b>	<b>DISTRITO</b>	<b>ZONA DE ESTUDIO</b>
<b>MANU</b>	Madre de Dios	Delta
<b>MANU</b>	Huepetuhe	Choque
<b>MANU</b>	Inambari	Dos de Mayo
<b>MANU</b>	Inambari	La Pampa

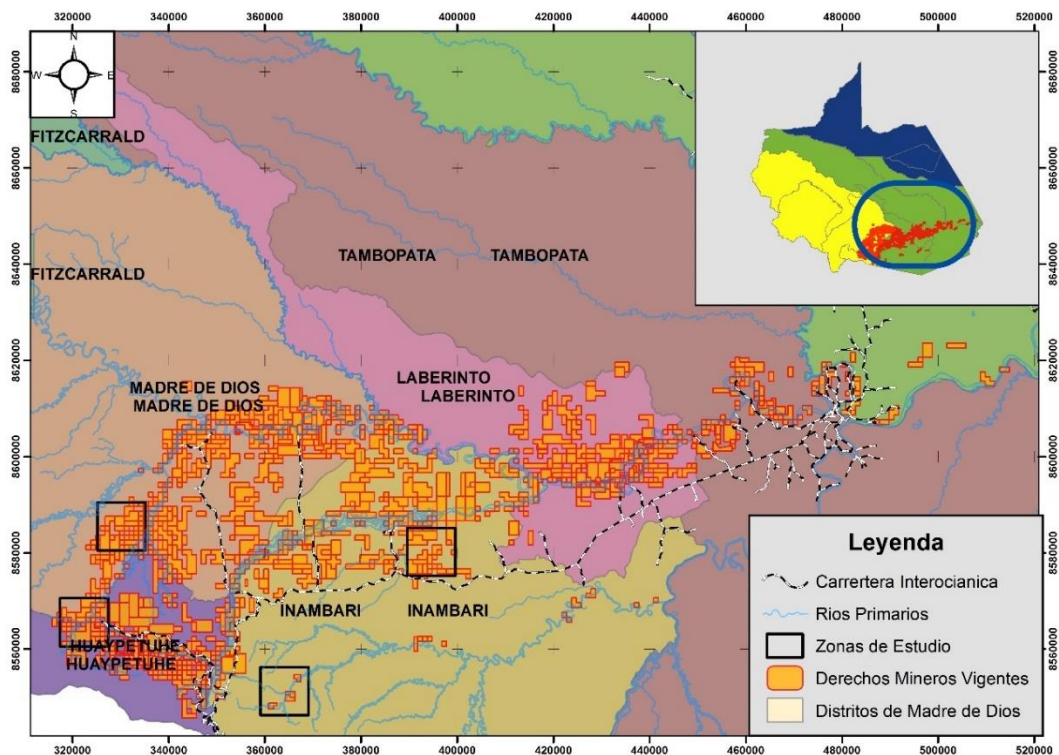


Figura 8. Ubicación de las zonas de estudio.

## Suelo

El tipo de suelo que se puede apreciar en las áreas abandonadas, después de haber sido trabajado minería son muy comunes en todas las zonas de la región; ya que tienen características en común como:

- Compactación de los suelos por donde transitan las maquinarias y en los lugares en los que se depositan los relaves para el caso de maquinarias pesas.
- Deforestación.
- Erosión del suelo.
- Destrucción de ecosistemas y desertificación.
- Formación de pozos artificiales y producción de montículos de cascajo.

- Pérdida de microfauna, fertilidad y materia orgánica del suelo.
- Formación de grandes agujeros con materia inerte, y un cambio total del paisaje (MINAM 2017).

### **Clima**

El clima de la zona es muy lluvioso, cálido y muy húmedo, según la clasificación climática de Thornthwaite (SENAMHI 2011). La temperatura promedio es de 30°C (Goulding et al. 2010), las precipitaciones superan los 2000 mm anuales lo cual ocasiona la lixiviación de los suelos arcillosos (SENAMHI 2011).

Las temperaturas máximas llegan a ser de 38°C y se presentan regularmente en los meses de setiembre a octubre, la precipitación anual oscila entre 1,600mm a 2,400mm (RNTAMB 2011).

### **Tipo de vegetación**

La mayoría de las especies que se encuentran en áreas abandonadas por minería son las que están en etapas de Brinzal y Latizal. En cuanto a las especies más importantes en la recuperación de áreas degradadas, mayor abundancia en poblaciones vegetales colonizadoras, las que mejor se adaptan a estas áreas, y aportan grandes cantidades de materia orgánica como base para el establecimiento de otras especies (Sajami 2017).

## **3.4.2 Adquisición de datos**

### **Adquisición de imágenes satelitales**

La metodología que se plantea en esta investigación se encuentra ligada a los fundamentos de Teledetección ampliamente desarrollados, en ésta se plantean diversos pasos que corresponden a la búsqueda y adquisición de información, selección, pre-procesamiento, procesamiento, análisis y presentación de los resultados.

Para evaluar la variabilidad temporal de la vegetación se adquirieron imágenes satelitales Landsat provistas del servidor EarthExplorer perteneciente a la NASA que se obtuvo gratuitamente desde su página web.

Resumen de las imágenes seleccionadas que se utilizaron en la investigación.

Tabla 7. *Escenas Landsat a utilizar*

AÑO	PATH/ROW	SATELITE	FECHA	RESOLUCION
1985	003-069	landsat 4-5 TM	06/05/1985	30 X 30 m
1986	003-069	landsat 4-5 TM	12/07/1986	30 X 30 m
1987	003-069	landsat 4-5 TM	16/08/1987	30 X 30 m
1988	003-069	landsat 4-5 TM	15/06/1988	30 X 30 m
1989	003-069	landsat 4-5 TM	20/07/1989	30 X 30 m
1990	003-069	landsat 4-5 TM	24/08/1990	30 X 30 m
1991	003-069	landsat 4-5 TM	14/10/1991	30 X 30 m
1992	003-069	landsat 4-5 TM	23/04/1992	30 X 30 m
1993	003-069	landsat 4-5 TM	13/06/1993	30 X 30 m
1994	003-069	landsat 4-5 TM	23/11/1994	30 X 30 m
1995	003-069	landsat 4-5 TM	16/04/1995	30 X 30 m
1996	003-069	landsat 4-5 TM	04/05/1996	30 X 30 m
1996	003-069	landsat 4-5 TM	02/04/1996	30 X 30 m
1997	003-069	landsat 4-5 TM	27/08/1997	30 X 30 m
1998	003-069	landsat 4-5 TM	27/06/1998	30 X 30 m
1999	003-069	landsat 4-5 TM	02/09/1999	30 X 30 m
2000	003-069	landsat 4-5 TM	20/09/2000	30 X 30 m
2001	003-069	landsat 4-5 TM	07/09/2001	30 X 30 m
2002	003-069	Landsat 7 ETM+	02/09/2002	30 X 30 m
2003	003-069	landsat 4-5 TM	15/10/2003	30 X 30 m
2004	003-069	landsat 4-5 TM	14/08/2004	30 X 30 m

2005	003-069	landsat 4-5 TM	18/09/2005	30 X 30 m
2006	003-069	Landsat 4-5 TM	19/07/2006	30 X 30 m
2007	003-069	Landsat 4-5 TM	23/08/2007	30 X 30 m
2008	003-069	Landsat 4-5 TM	25/08/2008	30 X 30 m
2009	003-069	Landsat 4-5 TM	28/08/2009	30 X 30 m
2010	003-069	Landsat 4-5 TM	12/06/2010	30 X 30 m
2011	003-069	Landsat 4-5 TM	03/09/2011	30 X 30 m
2012	003-069	Landsat 7 ETM+	24/06/2012	30 X 30 m
2013	003-069	Landsat 8 OLI	06/07/2013	30 X 30 m
2014	003-069	Landsat 8 OLI	10/08/2014	30 X 30 m
2015	003-069	Landsat 8 OLI	29/08/2015	30 X 30 m
2016	003-069	Landsat 8 OLI	16/09/2016	30 X 30 m
2017	003-069	Landsat 8 OLI	19/09/2017	30 X 30 m

Fuente: Tomado y adaptado de (Rojas 2017).

### **Adquisición de datos de precipitación**

Se descargaron los datos de precipitación mensual desde el servidor CLIMATE ENGINE para compilar datos de precipitación desde el año 1985 hasta el año 2017, esta metodología para datos de precipitación también se encuentra validada por el SENAMHI en el estudio realizado sobre la caracterización hidrológica para Madre de Dios (Santos 2017).

El sensor que se utilizó es Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS) siendo este el sensor que posee datos de precipitación desde

el año 1981 a la actualidad, los datos que se utilizaron de este sensor serán de 1985 hasta 2017.

### **3.4.3 Pre procesamiento de datos**

#### **3.4.3.1 Pre procesamiento de imágenes de satélite.**

##### **Calibración radiométrica**

La calibración de imágenes es un paso de procesamiento previo común para los analistas de teledetección que necesitan extraer datos y crear productos científicos a partir de imágenes. Calibración intenta compensar los errores radiométricos de los defectos del sensor, variaciones en ángulo de escaneo y ruido del sistema para producir una imagen que representa un verdadero espectro resplandor en el sensor (ENVI 2013a).

La herramienta de Calibración Radiométrica de ENVI brinda opciones para calibrar imágenes a radiancia, reflectancia, o temperaturas de brillo. Las opciones de calibración disponibles dependen de qué metadatos se incluya con las imágenes. La mayoría de los vendedores distribuye un archivo de metadatos o datos de efemérides junto con el dato de imagen (ENVI 2013a).

##### **Corrección atmosférica modelo FLAASH**

La corrección atmosférica es un proceso que se aplica a las imágenes digitales, con el propósito de eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen, como producto de la interacción del sensor con la atmósfera. Con el proceso de corrección atmosférica se logra mejorar la calidad visual de la imagen; así como, eliminar el componente intrusivo de la atmósfera; FLAASH es una herramienta de corrección atmosférica de primer orden que corrige las longitudes de onda en el visible a través de las regiones infrarrojas de infrarrojo corto y de onda corta, hasta 3  $\mu\text{m}$ . (Para térmicas regiones, utilice las Herramientas básicas → Preprocesamiento → Herramientas de calibración → Caudal térmico Opción de menú de

corrección.) A diferencia de muchos otros programas de corrección atmosférica que interpolan las propiedades de transferencia de radiación de una base de datos pre-calculada de resultados de modelado, FLAASH incorpora el código de transferencia de radiación MODTRAN4 (ENVI 2013b).

### Corrección de valores de reflectancia

La imagen resultante se deberá calibrar los valores de reflectancia de la superficie, para eso es necesario utilizar una operación matemática que se realiza banda por banda, permitiendo corregir los valores negativos y reemplazarlos con valores entre 0 y 1 (OSINFOR 2014):

$$(b1 \leq 0) * 0 + (b1 \geq 10000) * 1 + (b1 > 0 \text{ and } b1 < 10000) * \text{float}(b1) / 10000$$

Ecuación 4

### 3.4.3.2 Pre procesamiento de datos de precipitación

#### Re proyección de sistema de coordenadas.

Proyección de datos espaciales de un sistema de coordenadas a otro (ESRI 2016).

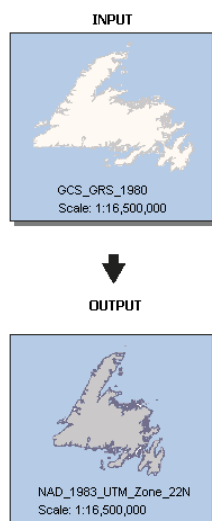


Figura 9. Proceso de transformación de coordenadas

Fuente: (ESRI 2016).

### Resamplero de píxeles de las imágenes de precipitación.

Cambia la resolución espacial de su dataset ráster y establece reglas para agregar o interpolar valores en los nuevos tamaños de píxel (ESRI 2016).

### Transformación a puntos de precipitación.

Convierte un dataset ráster a formato shapefile para señalar características (ESRI 2016).

### Interpolación a partir de puntos utilizando una técnica de distancia inversa ponderada (IDW).

Interpola una superficie de trama de puntos usando una técnica de distancia inversa ponderada (IDW), y generando un raster con una resolución espacial de 30x30 m (ESRI 2016).

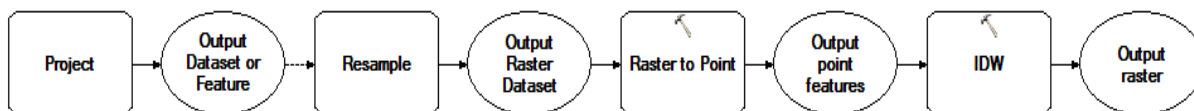


Figura 10. Flujo de procesos de procesamiento de datos de precipitación.

Fuente: (ESRI 2016).

## 3.4.4 Procesamiento de datos

### Índice de vegetación mejorado EVI

Este índice corrige las distorsiones en la luz reflejada causadas por la nubosidad y los aerosoles en la atmósfera que bloquean la visión de los satélites. El EVI no se satura fácilmente como el NDVI cuando se observa selva tropical y otras áreas de la Tierra con grandes cantidades de clorofila.

$$EVI = G * \frac{NIR - VIS}{NIR + C1 * VIS - C2 * BLU + L}$$

Ecuación 5

Donde C1 y C2, son los coeficientes diseñados para corregir los efectos de la dispersión y absorción de los aerosoles, respectivamente. El valor de C1 se ha



fijado en 6 y el de C2 en 7,5. G representa un factor de cambio igual a 2,5 y L corresponde a un ajuste de la señal antecedente del dosel de las plantas cuyo valor es 1. La banda (BLU) es usada para corregir la influencia de los aerosoles sobre la banda roja (Huete et al. 2002; Ferreira et al. 2004; Roberts, Keller y Soares 2003; Xiao et al. 2005).

### **3.5 Tratamiento de los datos**

#### **Análisis de Índice de Vegetación Mejorada (EVI)**

Índice de vegetación mejorado (EVI), fue optimizado a partir del NDVI para reducir la influencia de la atmósfera, este índice es más apropiado para zonas con escasa cobertura vegetal y fuerte efecto del suelo desnudo y no presenta problemas de saturación como el NDVI en zonas con altas densidades de biomasa.

Los rangos del Índice de Vegetación Mejorada (EVI) varían entre -1 y 1, el EVI y el NDVI tienen comportamiento similar en su interpretación biológica para caracterizar el área foliar y vigorosidad de la vegetación, el cero (0), representa al valor aproximado a la falta de vegetación (suelo desnudo) y cerca al 1 la alta presencia de vegetación (mayor densidad) (Rojas 2017).

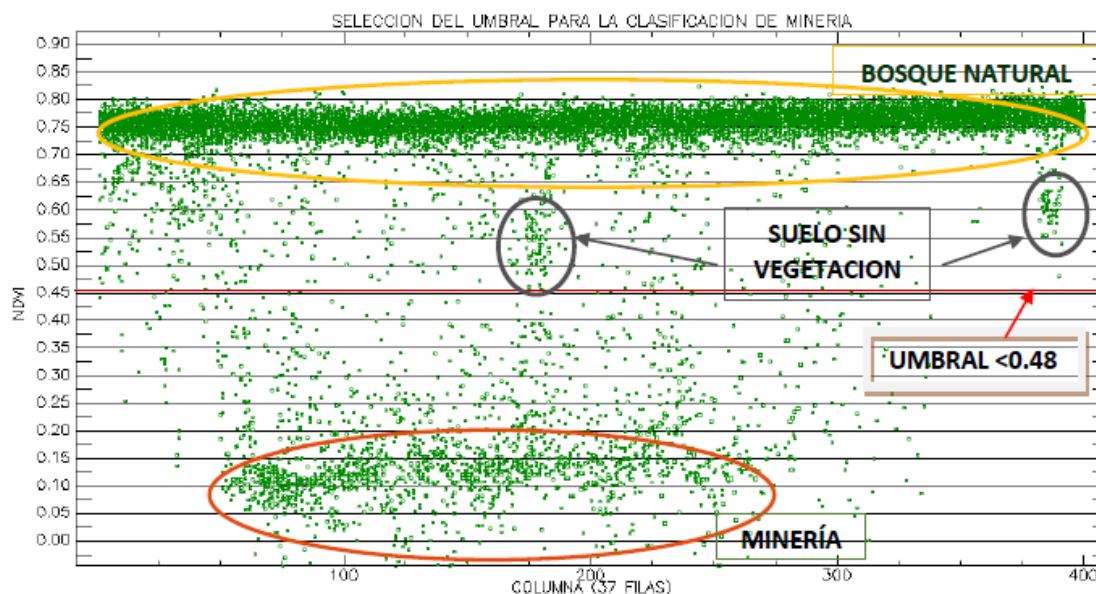


Figura 11. Valores de NDVI para Madre de Dios.

Fuente: (Rojas 2017).

En la figura 11 se muestran los valores de NDVI para zonas de minería aurífera aluvial en Madre de Dios (Rojas 2017), en Madre de Dios no se realizaron investigaciones en las cuales hayan utilizado en Índice de Vegetación Mejorado (EVI), la investigación tomara como referencia a parámetros de NDVI ya determinados por (Rojas 2017), se tomara como referencia estos datos debido al comportamiento similar que tienen ambos índices.

### Análisis de estadios sucesionales

Los datos obtenidos de Índice de Vegetación Mejorado (EVI), se utilizarán para caracterizar los estadios sucesionales, se hará validación de campo y se contrastarán los datos obtenidos con imágenes de alta resolución (WorldView, Planet).

## **Análisis de una serie climática**

Los datos provienen directamente de sensores meteorológicos que se encuentran en órbita, para ello es necesario estudiar su calidad y fiabilidad para mostrar las series temporales de datos de precipitación.

### **Estadísticos básicos**

#### **Modelización lineal entre variables**

La regresión lineal permite estudiar cómo se relacionan dos variables prediciendo el valor de una de ellas a partir de la otra cuando la relación se considera lineal, convencionalmente, el eje de abscisas se utiliza para representar la variable «independiente» ( $x$ ), o predictiva, y el eje de ordenadas para la variable «dependiente» ( $y$ ), o pronosticada.

Esencialmente, la regresión lineal busca describir la relación entre dos variables, que muestran gráficamente su dispersión, en una única línea recta; para ello se elige la recta que produce el menor error de predicción de la variable dependiente en función de la variable independiente, el criterio más habitual es el de ajuste por mínimos cuadrados que consiste en minimizar la suma de los residuos al cuadrado (Wilks 2011).

La recta de regresión está caracterizada por la ordenada en el origen y la pendiente ( $a$  y  $b$ , respectivamente, en la Ecuación):

$$\hat{y} = a + bX \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde  $\hat{y}$  es la variable pronosticada en función de la variable predictiva,  $X$ , El error o residuo, es la distancia entre la variable dependiente y la variable predicha en la recta de regresión:

$$e_i = y_i - \hat{y}(x_i) \quad \text{Ecuación 7}$$

Las expresiones de  $a$  y  $b$  se obtienen analíticamente con el criterio de mínimos cuadrados, es decir, minimizando las diferencias entre los valores observados y los pronosticados:

$$\sum_{i=1}^n (e_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - [a + bx_i])^2$$

Ecuación 8

Efectuando la derivada en función de  $a$  y  $b$ , igualando a 0 y arreglando la expresión se obtiene el valor de la pendiente:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Ecuación 9

Y también de la ordenada en el origen:

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

Ecuación 10

La pendiente muestra la relación entre las dos variables; el signo indica si la relación es positiva o negativa, y se interpreta como el incremento de la variable dependiente por cada incremento en una unidad de la variable independiente; una relación de la misma magnitud producirá pendientes de  $\pm 1$ . Ahora bien, la pendiente de la recta de regresión no mide la fuerza de la relación, excepto cuando se estandariza la variable dependiente respecto al mismo periodo de tiempo que la variable independiente, entonces, el valor de la pendiente se transforma en el coeficiente de correlación de Pearson.

Para medir la bondad del ajuste en la regresión lineal y cuantificar el grado de asociación entre las dos variables se utiliza el coeficiente de correlación o coeficiente de correlación lineal de Pearson:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Donde  $\sigma_{xy}$  es la covarianza de las dos variables, y  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  la desviación típica de cada una de ellas. Este coeficiente otorga valores comprendidos entre  $-1$  y  $1$ . El valor  $0$  indica que no existe ninguna relación entre las variables; los valores negativos muestran correlación negativa entre ellas, cuando una crece la otra decrece; un valor de  $-1$  indica una correlación negativa perfecta, y, de forma análoga, los valores positivos muestran una correlación positiva, ambas variables aumentan; y  $1$  es la correlación positiva perfecta.

El coeficiente de determinación ( $r^2$ ) es el cuadrado del coeficiente de correlación y especifica la proporción de la variabilidad de una de las dos variables descrita por la otra, este coeficiente proporciona valores comprendidos entre  $0$  y  $1$ , donde  $0$  indica que no existe relación lineal entre las variables y  $1$  indica una perfecta asociación lineal (Murphy 1995).

Tanto el coeficiente de correlación de Pearson como el de determinación no son robustos, porque no detectan las asociaciones fuertes entre las variables cuando esta relación no es lineal, además, no son resistentes ya que pueden ser muy sensibles a uno o unos pocos valores atípicos (Wilks 2011).

En la regresión lineal se busca la relación entre una variable dependiente ( $y$ ) y una variable independiente ( $x$ ); en cambio, con el coeficiente de correlación y determinación se obtiene el grado de asociación entre las dos variables.

El grado de bondad o significación de una correlación se evalúa mediante el *p-value*, o p-valor. Si es inferior a  $0,05$  la correlación es significativa al nivel del 95% y si es inferior a  $0,01$ , al nivel del 99%.

Finalmente, conviene indicar que una correlación significativa entre dos variables no tiene por qué implicar causalidad entre los comportamientos de ellas, de ahí que el experto ha de establecer las relaciones causa-efecto que expliquen esa relación.

### **Evaluación de tendencias en las series temporales**

Una serie de datos se dice que muestra tendencia si, en promedio, la serie aumenta o disminuye progresivamente. Existen muchos métodos estadísticos para estimar la evolución temporal de una serie climática. La evaluación de los cambios a largo plazo frecuentemente se describe y cuantifica mediante tendencias lineales. Numerosos autores han estudiado las ventajas y desventajas de usar este método (IPCC 2014; Storch y Zwiers 1999; Wilks 2011).

Una de las cuestiones que hay que tener en cuenta en el análisis de series temporales de variables climáticas y de datos obtenidos desde satélites es la no estacionalidad estricta de algunas series; es decir, contienen un cierto grado de estocasticidad. Por este motivo, el cálculo de tendencia lineal tanto paramétrico como no paramétrico será el que de forma más habitual se utilice en este capítulo por su sencillez en la implementación y facilidad en la interpretación de los resultados. La gran mayoría de autores citados en este documento lo utilizan con frecuencia en sus trabajos.

### **Regresión lineal. Coeficiente de correlación ( $r$ ) y determinación ( $r^2$ )**

La regresión lineal, comentada anteriormente, evalúa la relación entre dos variables; ahora bien, si una de ellas es el tiempo, lo que se analiza es la evolución cronológica de la otra variable.

El término independiente de la recta de regresión lineal corresponderá al tiempo, y la variable dependiente, a la variable a analizar, en este caso la precipitación o el índice de vegetación, por lo tanto, los valores positivos de la pendiente en la recta de regresión indicarán tendencias crecientes, un aumento de la variable a lo largo del tiempo; los valores próximos a cero indicarán un comportamiento constante de la variable, y los valores negativos, una disminución de la variable en el tiempo.

El significado y la obtención de los coeficientes de correlación y determinación es el mismo que se ha comentado a la modelización lineal entre las variables, pero

ahora la variable predictiva es el tiempo, estos coeficientes son adecuados cuando la relación entre las variables es lineal (Murphy 1995).

Tabla 8. *Valores del coeficiente de correlación Pearson.*

Coeficiente	Interpretación
$r = 1$	Correlación perfecta
$0,80 < r < 1$	Muy alta
$0,60 < r < 0,80$	Alta
$0,40 < r < 0,60$	Moderada
$0,20 < r < 0,40$	Baja
$0 < r < 0,20$	Muy baja
$r = 0$	nula

Fuente: (Murphy 1995).

### **Estimador de tendencia no paramétrico Theil-Sen y test de significación estadística Mann-Kendall**

Como se ha visto anteriormente, tanto el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) como el de determinación ( $r^2$ ) tienen por objetivo examinar el grado de asociación lineal entre dos variables, pero si la relación no es lineal, el coeficiente de correlación de Pearson no será un estadístico adecuado para medir el grado de asociación.

Para evaluar la tendencia de la precipitación o vegetación en el tiempo se utilizará una técnica no paramétrica propuesta por (Theil 1950) y modificada por (Sen 1968), el estimador de Theil-Sen, también conocido como estimador de la pendiente, realiza un análisis de cada píxel por separado en función del tiempo. Para ello, calcula las pendientes definidas entre los posibles pares de píxeles; la estimación de la pendiente final es la mediana del conjunto de valores. El número máximo de pendientes calculadas para cada píxel es de  $n(n - 1) / 2$ , donde  $n$  es el número de datos comprendido en el estudio: años, meses, días (Neeti y Eastman 2011).

La técnica Theil-Sen es robusta frente a valores atípicos y tiene la capacidad de rechazar los valores atípicos sin afectar la pendiente, el número de valores fuera de rango que este método puede rechazar equivale al 29 % del tamaño de la muestra (Hoaglin, Mosteller y Tukey 2000).

Para evaluar el grado de significación de la pendiente Theil-Sen se utiliza el coeficiente de correlación de Mann-Kendall (Neeti y Eastman 2011), también conocido como Tau-Kendall, este método es análogo al caso de la regresión lineal, donde la pendiente de la recta de regresión se evalúa a través del coeficiente de correlación,  $r$ .

En el test de Mann-Kendall (Hirsch y Slack 1984; Stuart 1956; Mann 1945) los datos se ordenan respecto al tiempo donde cada valor se compara con el valor del dato posterior o anterior, el valor inicial del estadístico Mann-Kendall,  $S$ , se supone que es cero (no existe tendencia), si el valor de un dato es mayor respecto a los valores posteriores,  $S$  incrementa en 1, y al contrario, si el valor es menor,  $S$  disminuirá en 1 su valor. El resultado neto de todos estos incrementos y decrementos proporcionan el valor final de  $S$ .

El estadístico  $S$  de Mann-Kendall se obtiene mediante la ecuación:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signo}(x_i - x_j) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

$$\text{signo}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i - x_j < 0 \\ 0 & \text{si } x_i - x_j = 0 \\ -1 & \text{si } x_i - x_j > 0 \end{cases}$$

Un valor alto y positivo de  $S$  es indicador de una tendencia creciente, y un valor negativo indica una tendencia decreciente en el tiempo.

Si todos los datos analizados aumentaran con el tiempo,  $S = n(n - 1) / 2$ , el coeficiente de correlación debería de ser igual a 1, en caso contrario, si todos los



datos disminuyeran con respecto al tiempo, el coeficiente sería igual a -1, por lo tanto, si se divide  $S$  por  $n(n-1)/2$  dará un valor comprendido entre -1 y 1, que se denomina *coeficiente de correlación Tau- Kendall* (Helsel y Frans 2006), este coeficiente mide el grado de asociación monotónica entre una variable y el tiempo, y es:

$$\tau = \frac{S}{n(n-1)/2} \quad \text{Ecuación 133}$$

Donde  $n$  es la cantidad de datos ordenados respecto al tiempo, sin embargo, es necesario calcular la probabilidad asociada a  $S$  y al tamaño de la muestra,  $n$ , para cuantificar estadísticamente la importancia de la tendencia, el nivel de significancia de  $\tau$  se comprueba comparando  $S$  con lo que se esperaría cuando la hipótesis nula es verdadera ( $H_0$ : las variables son independientes, no existe tendencia). El  $p$  valor resume la probabilidad de obtener el valor observado de  $\tau$ , o uno más extremo, cuando la hipótesis nula es verdadera. Cuando  $p$  es pequeño, la probabilidad de que no haya tendencia también es pequeña, y  $H_0$  se rechaza. Los valores críticos se encuentran en la tabla de la distribución normal.

### Puntos de control

con el objetivo de determinar la veracidad de los patrones establecidos en la interpretación de la imagen; para saber el número de puntos a verificar se utilizara la distribución binomial de probabilidad (Chuvienco 2010), mediante la siguiente formula:

$$n = \frac{Z^2 * P * Q * N}{(N-1)E^2 + Z^2 + P * Q} \quad \text{Ecuación 144}$$

Donde:

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

P: Indica el porcentaje de aciertos estimados, 0,50 (50%).

Q: Indica el porcentaje de errores (Q= 1- P), 0,50 (50%)

N: Tamaño de la población

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

Considerando los porcentajes de acierto y error iguales a 50% y 50%, además del error estándar permisible 5%, para 95% de confianza, la fórmula queda definida en la forma siguiente:

$$n = \frac{(1,96)^2 * 0,5 * 0,5 * 40000}{(40000 - 1) * 0,05^2 + 1,96^2 + (0,5 * 0,5)} = 368,097$$

$$n = 368$$

Este resultado nos indica que se debe distribuir y verificar 368 puntos, según la metodología de (MINAM 2014), indica que cada punto distribuido aleatoriamente representa un pixel, los puntos serán distribuidas en las 4 zonas de estudio; donde cada pixel tiene resolución espacial de 30x30m, equivalente a 0,09 ha distribuidas aleatoriamente en las 4 zonas de estudio.

### **Índice de Kappa**

Para el proceso de validación de la investigación se realizará una validación mixta, se utilizarán imágenes de alta resolución y visita in situ, para obtener el grado de exactitud se utilizará el índice de Kappa en la cual su varianza es usada, en la comunidad de teledetección, para realizar pruebas estadísticas de diferencias significativas. El índice de kappa refleja la concordancia inter-observador y puede ser calculado en tablas de cualquier dimensión, siempre y cuando se contrasten dos observadores (Landis y Koch 1977).

$$k = \frac{[(\sum \text{concordancias observadas}) - (\sum \text{concordancias atribuibles al azar})]}{[(\sum \text{total de observaciones}) - (\sum \text{concordancias atribuibles al azar})]}$$

Ecuación 155

Donde:

$$\sum \text{concordancias atribuibles al azar} = \frac{\text{numero de acuerdos}}{\text{numero de desacuerdos} + \text{numeor de desacuerdos}}$$

## **CAPITULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACION**

### **4.1 Análisis de los datos de precipitación**

La precipitación es la variable climática más compleja de analizar estadísticamente y de representar espacialmente. Los mapas de precipitación se obtuvieron a partir de la precipitación captada por el sensor CHIRPS, que permite conocer y estimar la cantidad de precipitación en cada punto concreto, pero que también obliga a interpolar los datos para el resto del territorio y obtener datos de precipitación para todas las zonas de estudio.

#### **4.1.1 Análisis de la precipitación en las 4 zonas de estudio**

##### **4.1.1.1 Precipitación en zona de estudio Huepetuhe**

La zona de estudio de Huepetuhe, está situada dentro del corredor minero de Madre de Dios en las coordenadas latitud -70,601; altitud -12,924 y latitud -70,683; altitud -13,015. los datos de precipitación mensual y anual están en función a las fechas de adquisición de imágenes satelitales (ver tabla 7). El año en que se recogió el valor más elevado fue 1994 (396,28 mm), y el registro inferior corresponde a 1986 (75,042 mm), La precipitación tiene periodos demarcados en la cual disminuye drásticamente en periodos definidos y posteriormente tiene una tendencia a aumentar su intensidad para volver a decaer y repetir los periodos (ver figura 12 y tabla 8).

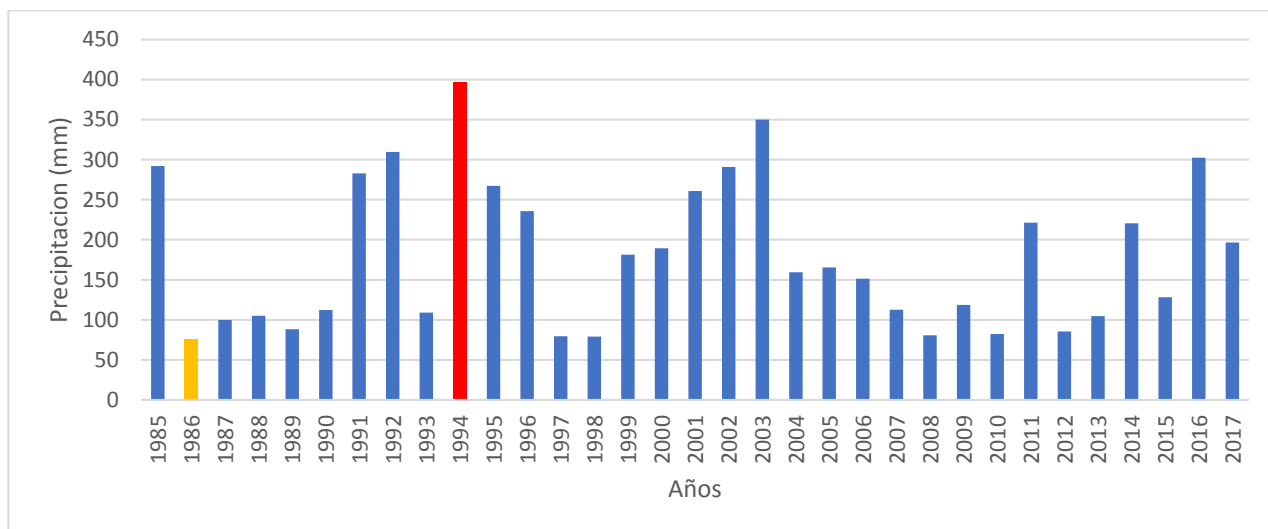


Figura 12. Precipitación mensual según la fecha de adquisición de las imágenes satelitales (Tabla 7).

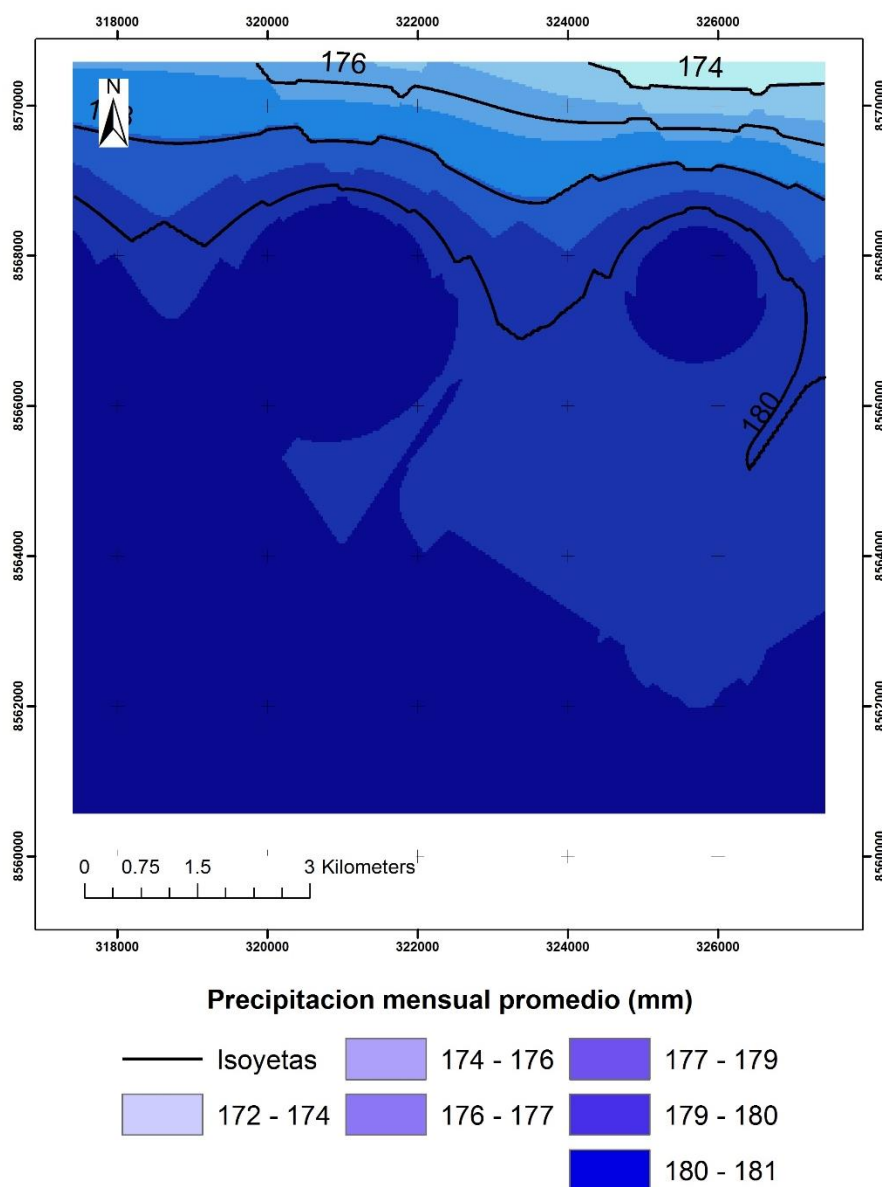
Tabla 9. Cuadro de resumen con medidas estadísticas descriptivas de la precipitación en la Zona de Huepetuhe para el periodo comprendido 1985-2017.

Media	179,864945
Mediana	159,427
Desviación estándar	92,1551748
coeficiente de variación	51,2357619
Coeficiente de asimetría	0,64169438
Rango	321,239845
Mínimo	75,0421553
Máximo	396,282
Suma	5935,54318
Cuenta	33

### Precipitación mensual promedio para la zona de Huepetuhe en el periodo 1985-2017.

La precipitación mensual promedio que se aprecia va de acuerdo a la fecha de adquisición de las imágenes satelitales, las zonas que se encuentran al sur tienen mayor incidencia a precipitación, las zonas al noroeste de la zona de estudio de

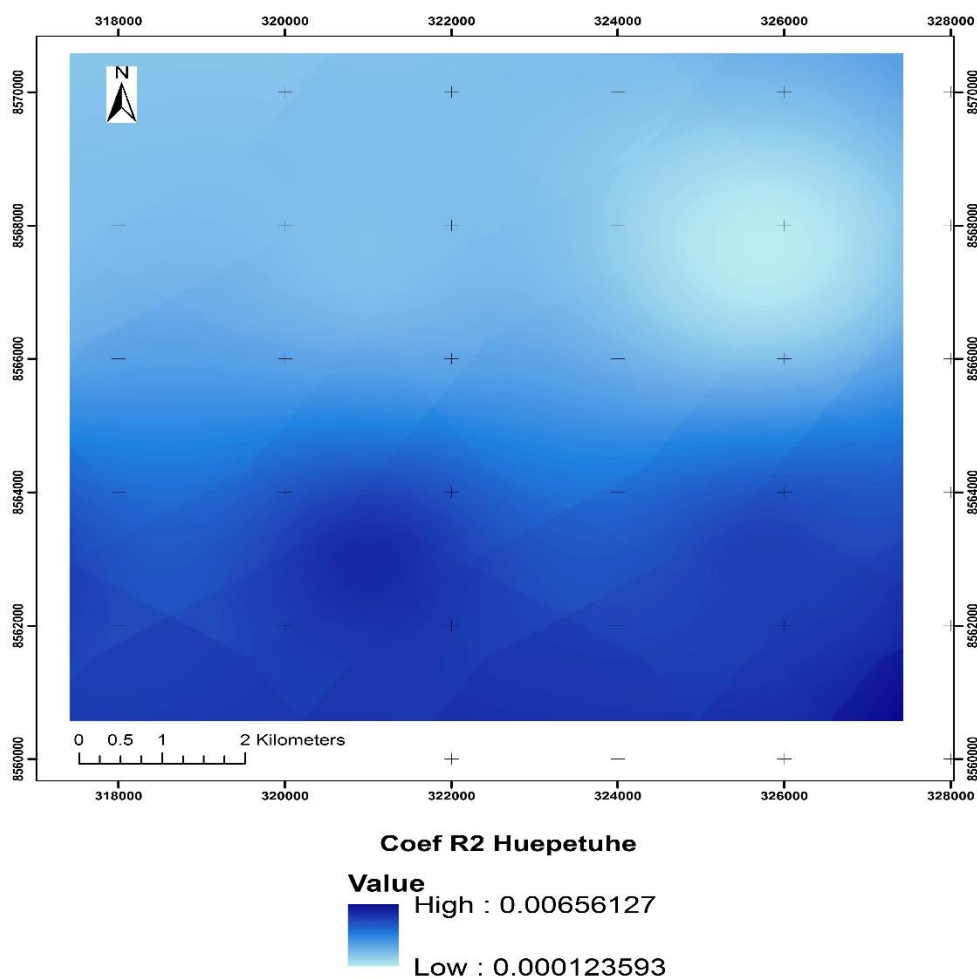
Huepetuhe muestran menor precipitación; cabe destacar que la variación entre el valor mínimo y valor máximo es de 9 mm de diferencia, se determina que no existe mucha variación de la precipitación en la zona de estudio como se observa en la figura 13.



*Figura 13.* Mapa de precipitación mensual promedio en la zona de estudio Huepetuhe en el periodo 1985-2017.

## Análisis de coeficiente de Determinación $R^2$ para datos de precipitación en el periodo 1985-2017.

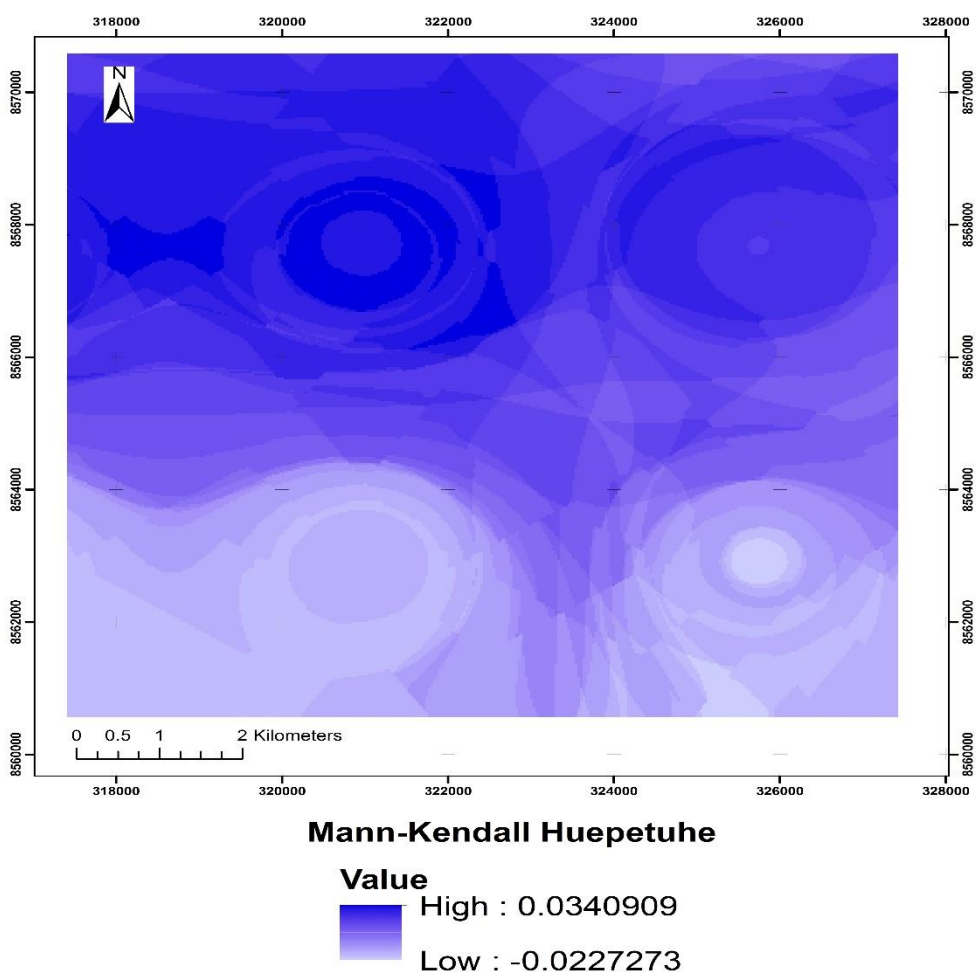
El coeficiente de determinación  $R^2$  para la zona de estudio de Huepetuhe reporta un grado de relación de variables (Periodo de estudio, Precipitación) muestran valores insignificantes estadísticamente llegando a un valor máximo de 0,0176.



*Figura 14.* Coeficiente de Determinación  $R^2$  para la zona de estudio Huepetuhe en el periodo 1985-2017.

### Análisis de tendencia Mann Kendall para datos de precipitación periodo 1985-2017.

El análisis de tendencia Mann Kendall para la zona de estudio de Huepetuhe, nos muestra una distribución espacial de valores con tendencia positiva de la precipitación hacia el noroeste y al noreste muestra distribución espacial de valores con tendencia negativa de la precipitación, la distribución de tendencias que se muestran en todo el periodo de estudio reporta pequeñas variaciones de la precipitación.

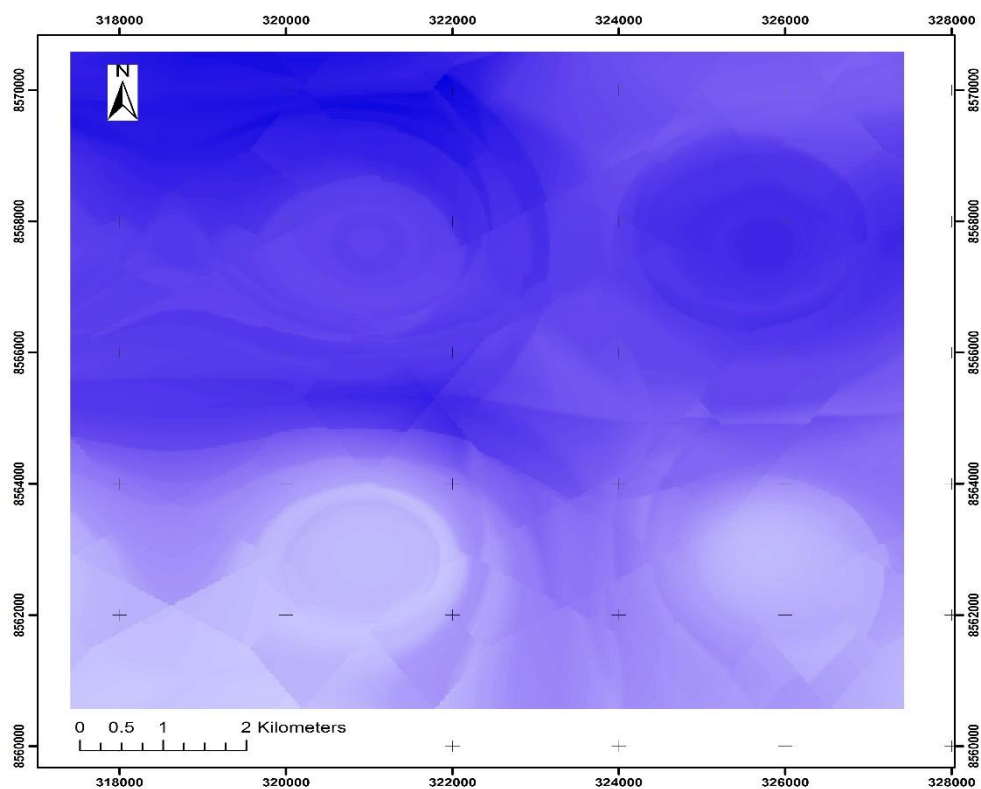


*Figura 15.* Test de tendencia Mann Kendall para la zona de Huepetuhe en el periodo de estudio 1985-2017.



## Análisis del Test de magnitud Theil-Sen para datos de precipitación en el periodo de estudio 1985-2017.

El análisis de magnitud de cambio de precipitación mediante el estimador de la pendiente Theil-Sen genero una imagen (figura 16) con la media de cambio de precipitación durante el periodo de estudio para cada pixel de la zona de estudio. Pixeles con valores positivos hasta un máximo de 0,36 indican un incremento en la precipitación; pixeles con valores negativos hasta un mínimo de -0,23 indican la disminución de la precipitación mientras las zonas con valores muy próximos a 0 indican una magnitud menos pronunciada de cambio. Las magnitudes de cambio negativo se concentraron espacialmente hacia la zona Sur Oeste de la zona de estudio y las magnitudes de cambio positivo de concentraron espacialmente hacia la zona Noroeste de la zona de estudio.



### Theil-Sen Huepetuhe

#### Value

High : 0.356221

Low : -0.228723

Figura 16. Magnitud de la pendiente Theil-Sen para la zona de Huepetuhe en el periodo de estudio 1985-2017.

#### 4.1.1.2 Precipitación en zona de estudio Delta

La zona de estudio de Delta, está situada dentro del corredor minero de Madre de Dios en las coordenadas latitud  $-70,61$ ; altitud  $-12,745$  y latitud  $-70,61$ ; altitud  $-13,853$ . los datos de precipitación mensual y anual están en función a las fechas de adquisición de imágenes satelitales (ver tabla 7). El año en que se recogió el valor más elevado fue 1994 (328,73 mm), y el registro inferior corresponde a 2008 (59,88 mm), La precipitación para esta zona de estudio no se rige bajo un patrón establecido ya que tiene variaciones muy diversas a lo largo de los años de estudios (ver figura 17 y tabla 9).

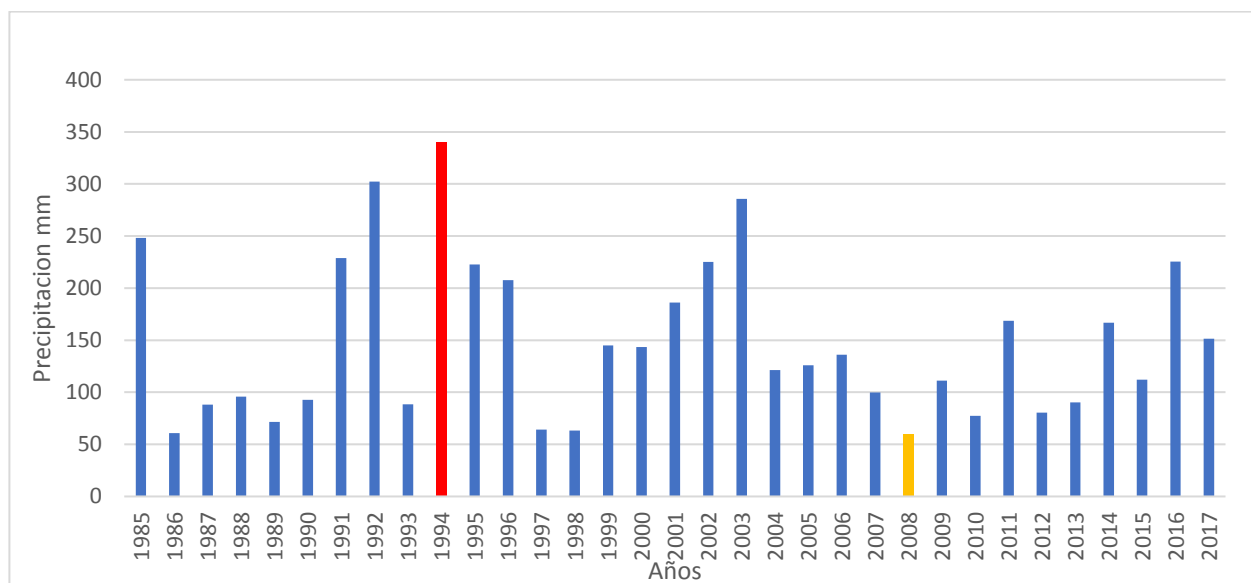


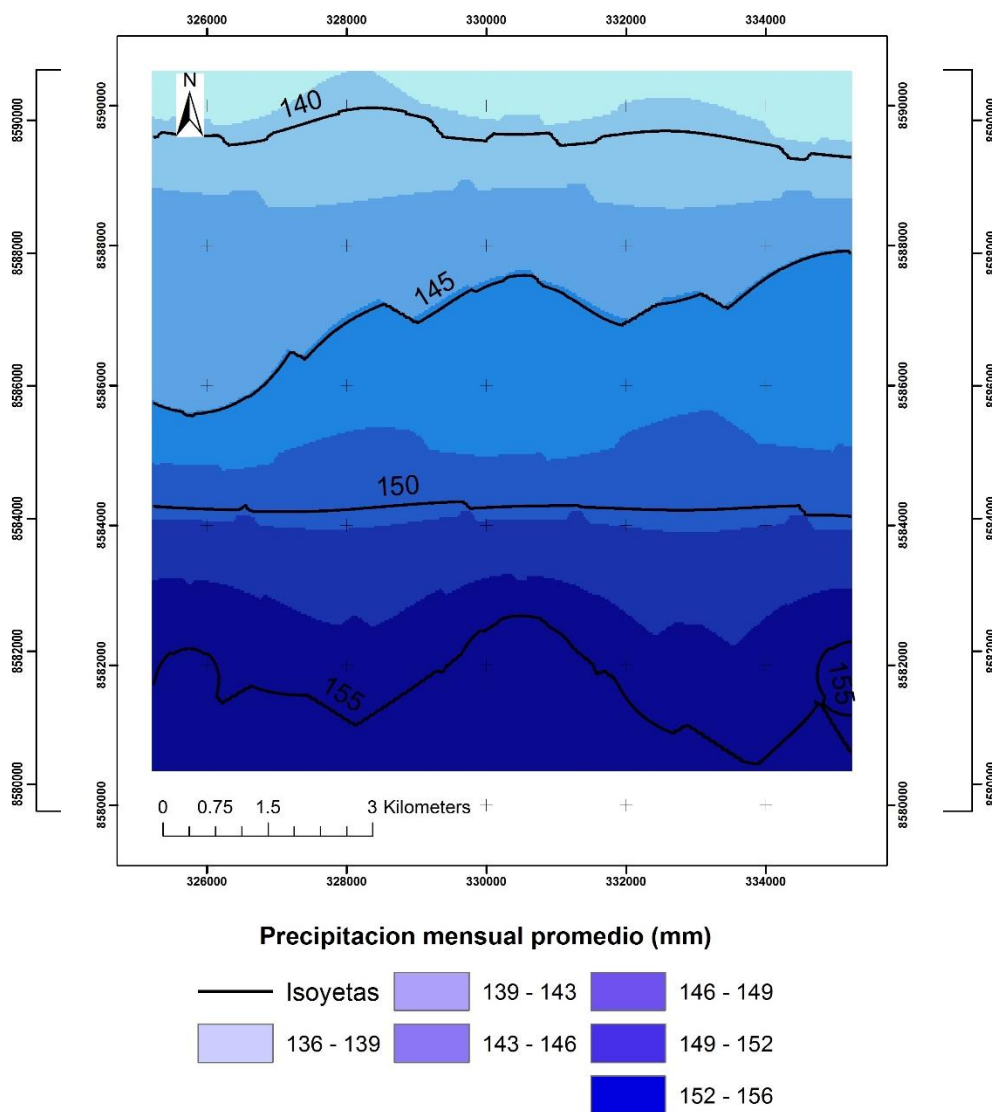
Figura 17. precipitación mensual de las fechas establecidas según la adquisición de las imágenes satelitales.

Tabla 10. Cuadro de resumen con medidas estadísticas descriptivas de la precipitación en la Zona de Delta para el periodo comprendido 1985-2017.

Media	145,022545
Mediana	125,862
Desviación estándar	79,8767762
coeficiente de variacion	55,0788678
Coeficiente de asimetría	0,71779419
Rango	328,731
Mínimo	59,88
Máximo	339,883
Suma	4785,744
Cuenta	33

### **Precipitación mensual promedio para la zona de Delta en el periodo 1985-2017.**

La precipitación mensual promedio que se aprecia va de acuerdo a la fecha de adquisición de las imágenes satelitales, las zonas que se encuentran al sur tienen mayor incidencia a precipitación, al norte de la zona de estudio de Delta se aprecia un descenso de la precipitación de manera estratificada; cabe destacar que la variación entre el valor mínimo y valor máximo es de 21 mm de diferencia.



*Figura 18.* Mapa de precipitación mensual promedio en la zona de estudio Delta en el periodo 1985-2017.

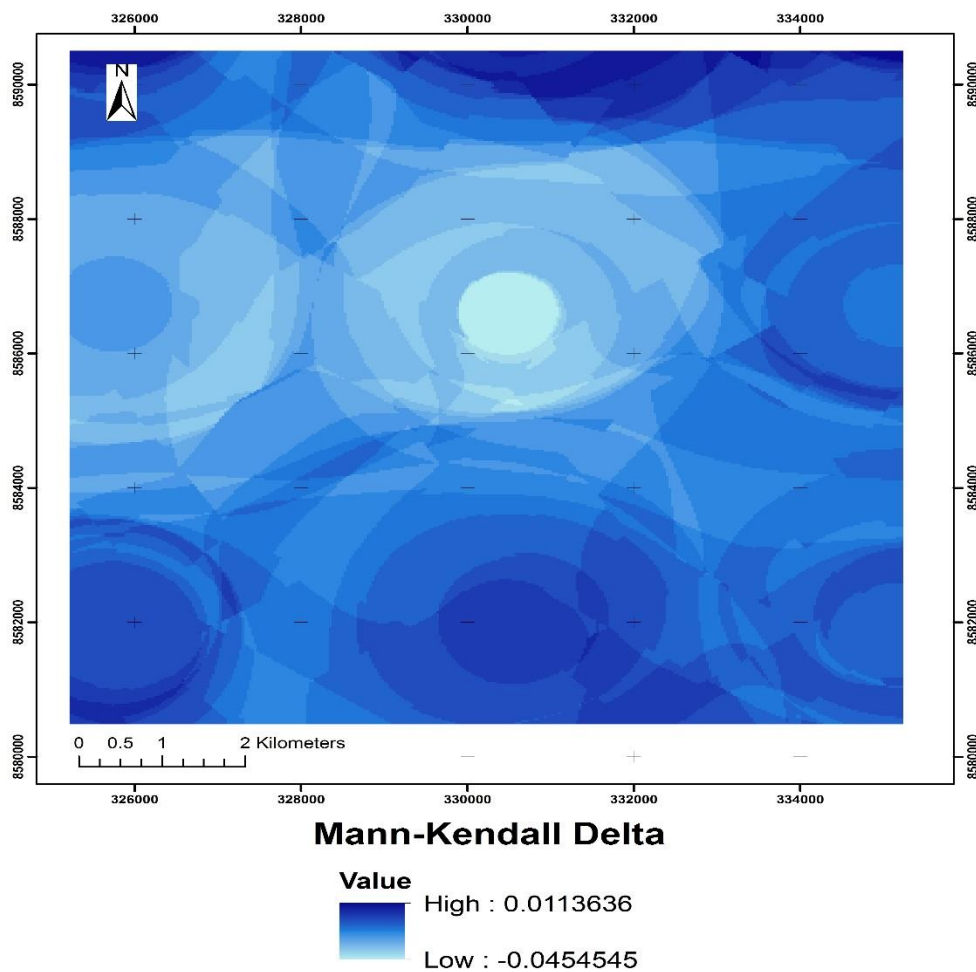
### **Análisis de coeficiente de Determinación $R^2$ para datos de precipitación en el periodo 1985-2017.**

El coeficiente de determinación  $R^2$  para la zona de estudio de Delta reporta un grado de relación de variables (Periodo de estudio, Precipitación) muestran valores insignificantes estadísticamente llegando a un valor máximo de 0,0176.

Figura 19. Coeficiente de Determinación  $R^2$  para la zona de estudio Delta en el periodo 1985-2017.

### Análisis de tendencia Mann Kendall para datos de precipitación periodo 1985-2017.

El análisis de tendencia Mann Kendall para la zona de estudio de Delta, nos muestra una distribución espacial de valores con tendencia positiva de la precipitación hacia el norte y en la parte céntrica muestra distribución espacial de valores con tendencia negativa de la precipitación, la distribución de tendencias que se muestran en todo el periodo de estudio reporta pequeñas variaciones de la precipitación.

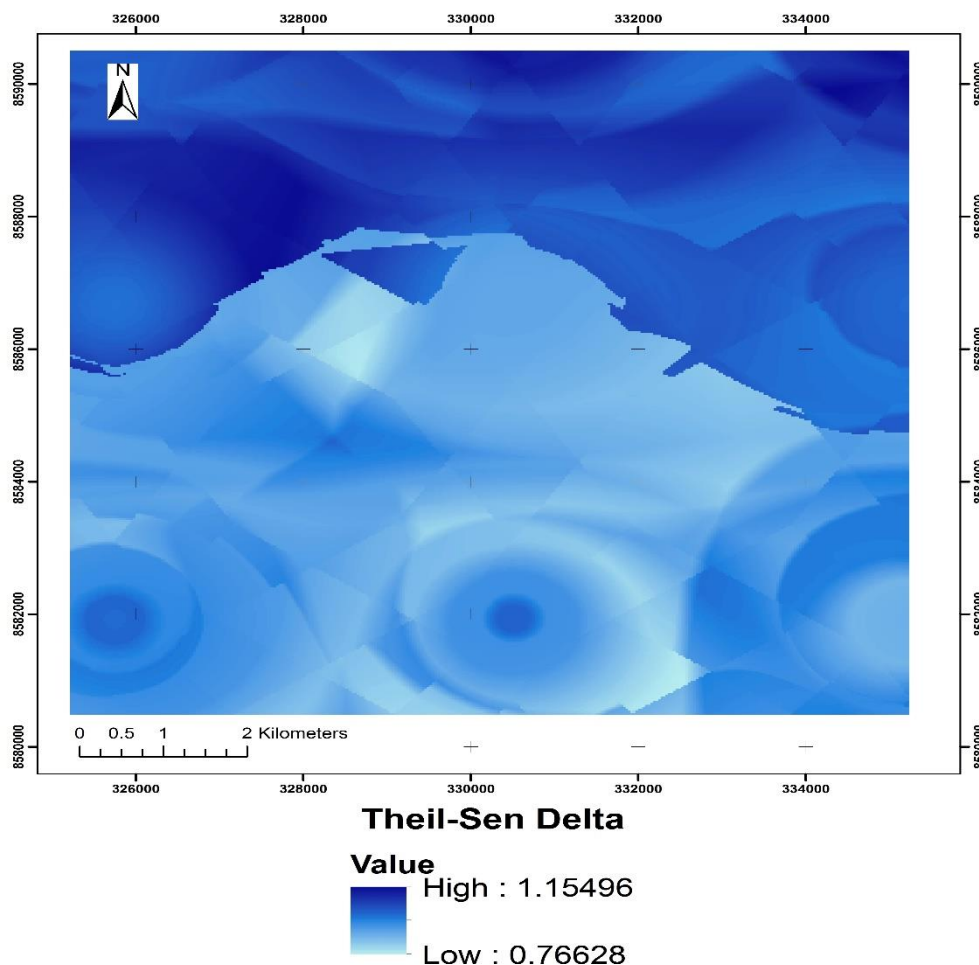


*Figura 20.* Test de tendencia Mann Kendall para la zona de Delta en el periodo de estudio 1985-2017.

### **Análisis del Test de magnitud Theil-Sen para datos de precipitación en el periodo de estudio 1985-2017.**

El análisis de magnitud de cambio de precipitación mediante el estimador de la pendiente Theil-Sen genero una imagen (figura 21) con la media de cambio de precipitación durante el periodo de estudio para cada pixel de la zona de estudio. Pixeles con valores positivos hasta un máximo de 1,15 indican un incremento en la precipitación; pixeles con valores mínimo de 0,77 indica un incremento en menor proporción de la precipitación. Los resultados para esta zona nos indica que la precipitación tiene una tendencia positiva para toda el área de estudio.

Las magnitudes de cambio positivo se concentraron espacialmente al largo de la zona estudio; al norte de la zona de estudio es donde se presenta mayores magnitudes de cambio positivo.



*Figura 21.* Magnitud de la pendiente Theil-Sen para la zona de Delta en el periodo de estudio 1985-2017.

#### 4.1.1.3 Precipitación en zona de estudio Dos de Mayo

La zona de estudio de Dos de Mayo, está situada dentro del corredor minero de Madre de Dios en las coordenadas latitud -70,299; altitud -13,075 y latitud -70,299; altitud -13,147. los datos de precipitación mensual y anual están en función a las fechas de adquisición de imágenes satelitales (ver tabla 7). El año en que se recogió el valor más elevado fue 1994 (358,05 mm), y el registro inferior corresponde a 1997 (67,88 mm La precipitación tiene periodos demarcados en

la cual disminuye drásticamente en periodos definidos y posteriormente tiene una tendencia a aumentar su intensidad para volver a decaer y repetir los periodos (ver figura 22 y tabla 10).

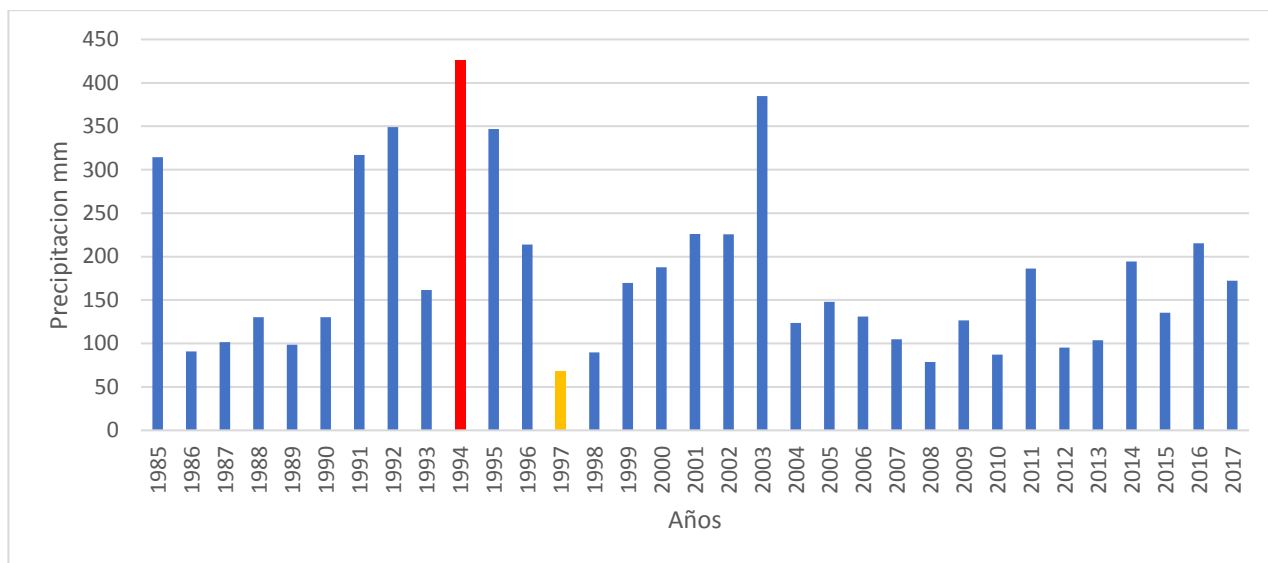


Figura 22. Precipitación mensual de las fechas establecidas según la adquisición de las imágenes satelitales.

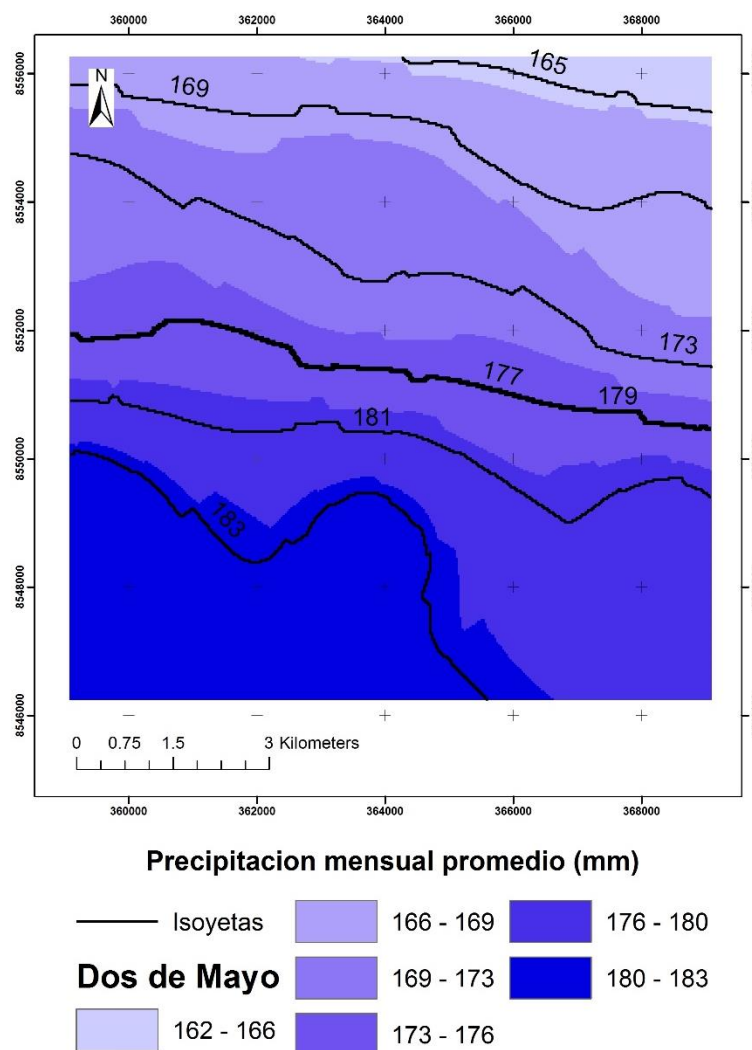
Tabla 11. Cuadro de resumen con medidas estadísticas descriptivas de la precipitación en la Zona de Dos de Mayo para el periodo comprendido 1985-2017.

Media	179,819879
Mediana	147,85
Desviación estándar	96,5966913
coeficiente de variación	53,7185832
Coeficiente de asimetría	1,12067491
Rango	358,057
Mínimo	67,887
Máximo	425,944
Suma	5934,056
Cuenta	33



### Precipitación mensual promedio para la zona de Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.

La precipitación mensual promedio que se aprecia va de acuerdo a la fecha de adquisición de las imágenes satelitales, las zonas que se encuentran al sur tienen mayor incidencia a precipitación, al norte de la zona de estudio se aprecia un descenso de la precipitación de manera estratificada; cabe destacar que la variación entre el valor mínimo y valor máximo es de 21 mm de diferencia.



*Figura 23.* Mapa de precipitación mensual promedio en la zona de estudio Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.

## Análisis de coeficiente de Determinación $R^2$ para datos de precipitación en el periodo 1985-2017.

El coeficiente de determinación  $R^2$  para la zona de estudio de Dos de Mayo reporta un grado de relación de variables (Periodo de estudio, Precipitación) muestran valores insignificantes estadísticamente llegando a un valor máximo de 0,0516.

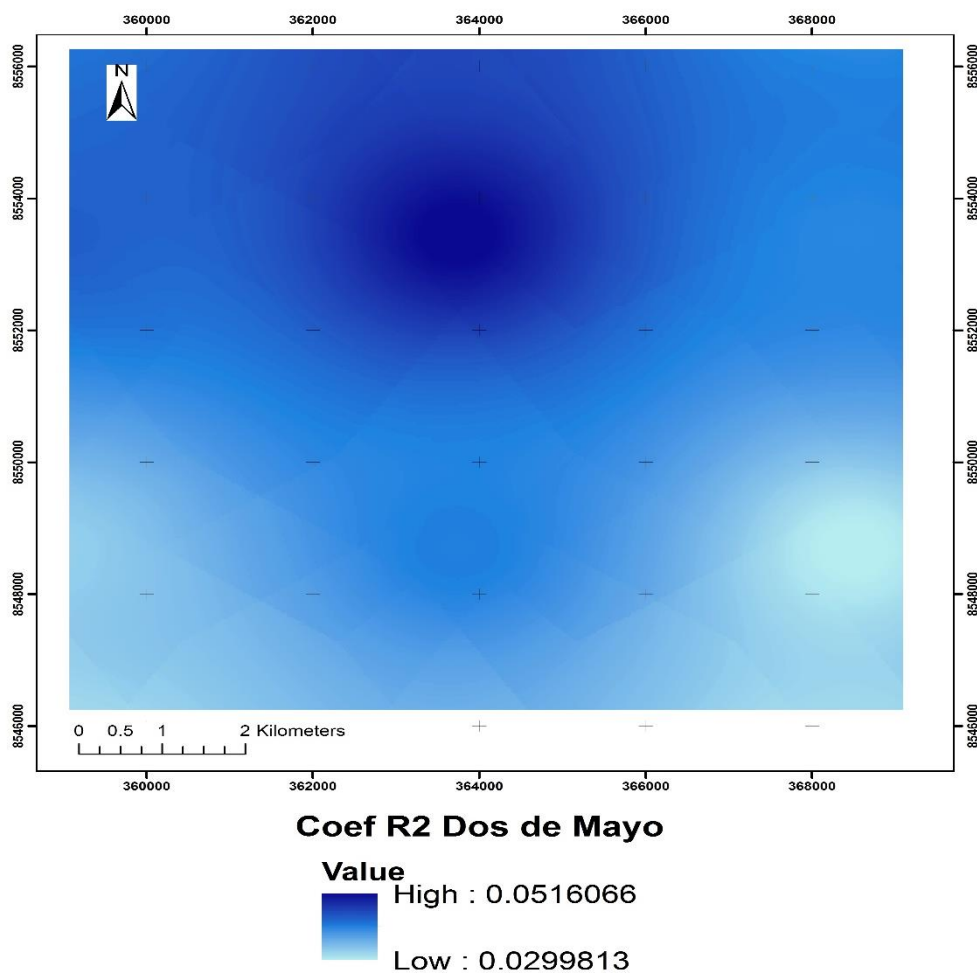
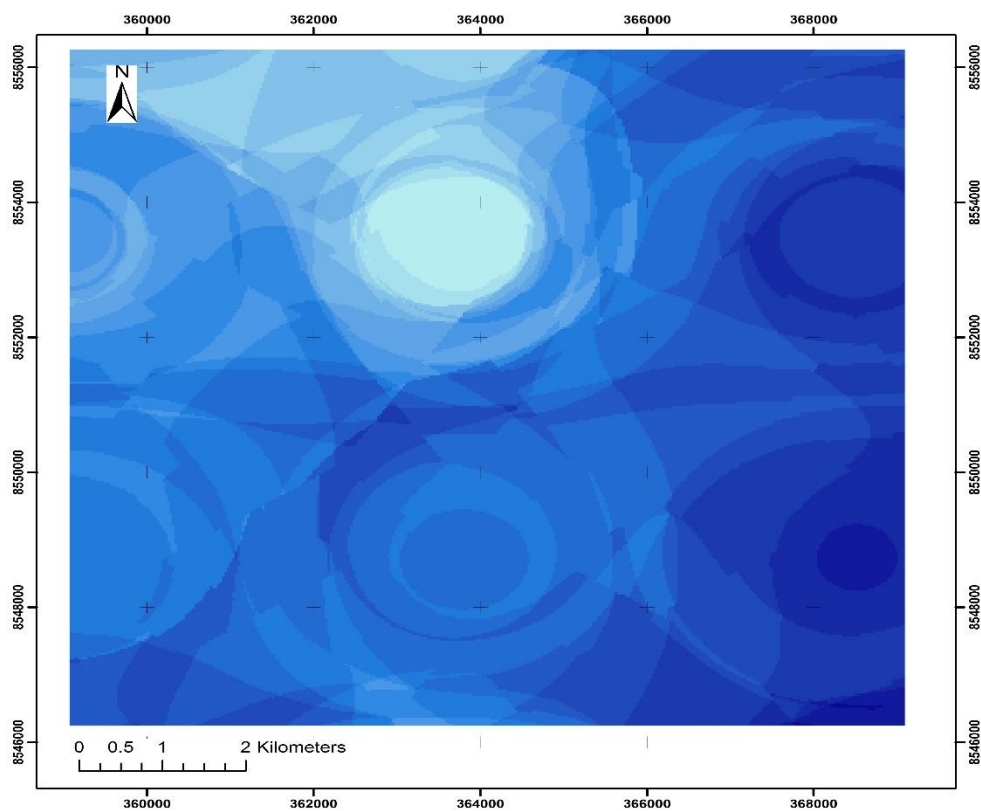


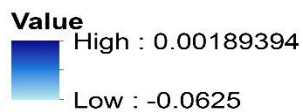
Figura 24. Coeficiente de Determinación  $R^2$  para la zona de estudio Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.

## Análisis de tendencia Mann Kendall para datos de precipitación periodo 1985-2017.

El análisis de tendencia Mann Kendall para la zona de estudio de Dos de Mayo, nos muestra una distribución espacial de valores con tendencia positiva de la precipitación hacia el sureste y en la parte céntrica muestra distribución espacial de valores con tendencia negativa de la precipitación, la distribución de tendencias que se muestran en todo el periodo de estudio reporta una disminución en la intensidad de la precipitación.



**Mann-Kendall Dos de Mayo**

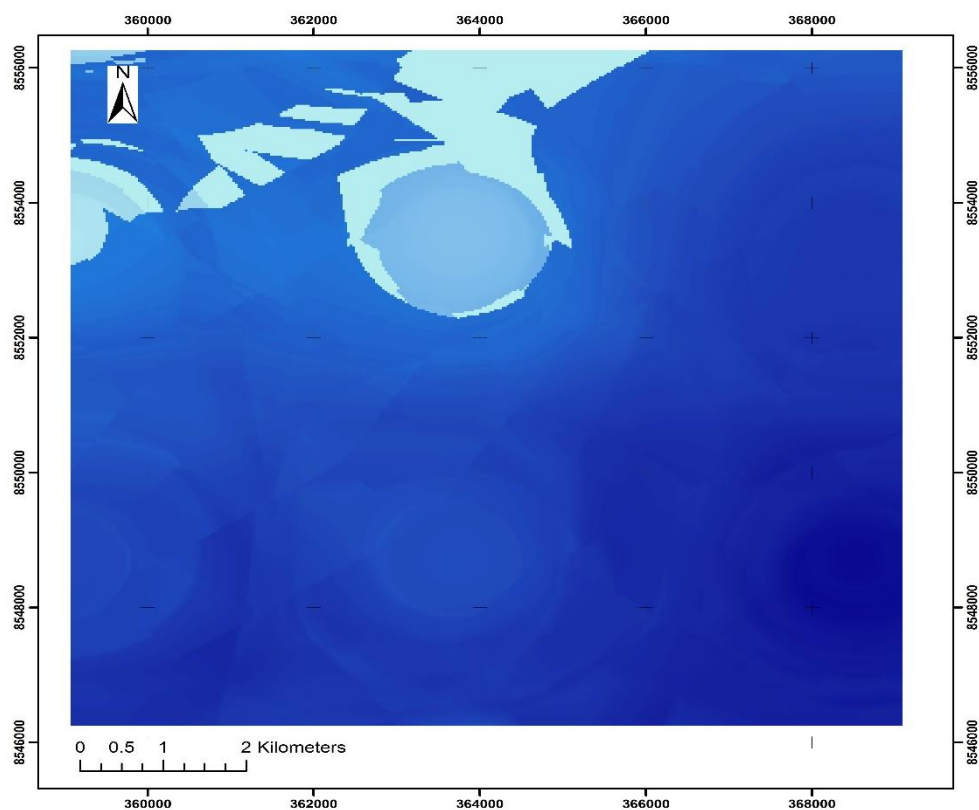


*Figura 25.* Test de tendencia Mann Kendall para la zona de Dos de Mayo en el periodo de estudio 1985-2017.

## Análisis del Test de magnitud Theil-Sen para datos de precipitación en el periodo de estudio 1985-2017.

El análisis de magnitud de cambio de precipitación mediante el estimador de la pendiente Theil-Sen genero una imagen (figura 26) con la media de cambio de precipitación durante el periodo de estudio para cada pixel de la zona de estudio. Pixeles con valores positivos hasta un máximo de 4,22 indican un incremento en la precipitación; pixeles con valores mínimo de 0,62 indica un incremento en menor proporción de la precipitación. Los resultados para esta zona nos indica que la precipitación tiene una tendencia positiva para toda el área de estudio.

Las magnitudes de cambio positivo se concentraron espacialmente al largo de la zona estudio; al sureste de la zona de estudio es donde se presenta mayores magnitudes de cambio positivo.



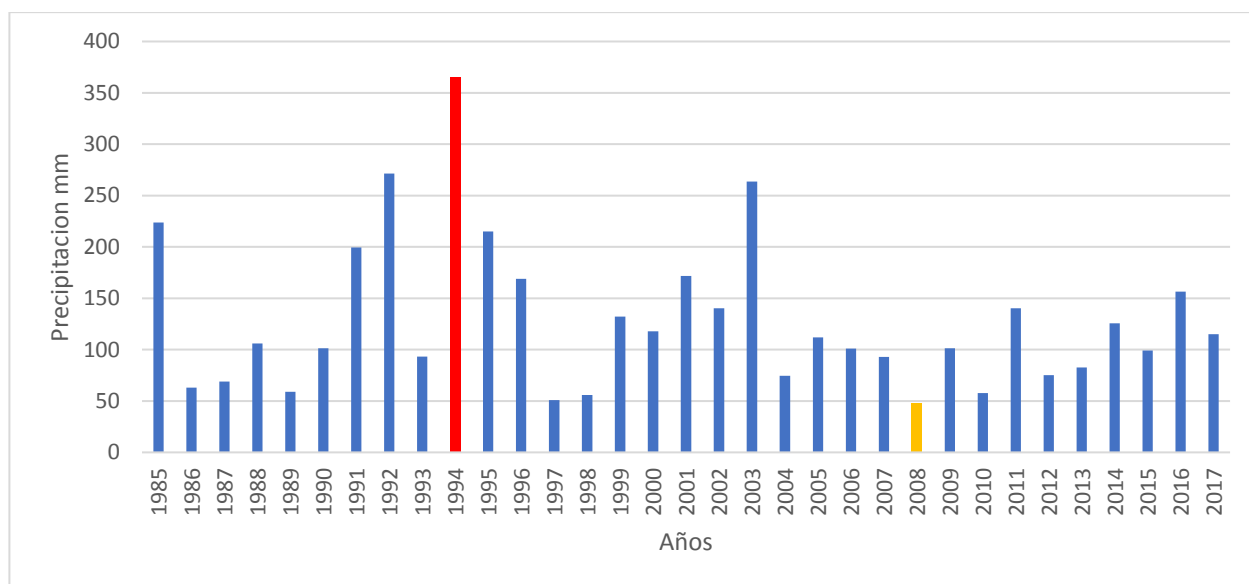
**Theil-Sen Dos de Mayo**



*Figura 26.* Magnitud de la pendiente Theil-Sen para la zona de Dos de Mayo en el periodo de estudio 1985-2017.

#### 4.1.1.4 Precipitación en zona de estudio La Pampa

La zona de estudio de La Pampa, está situada dentro del corredor minero de Madre de Dios en las coordenadas latitud -70,015; altitud -12,798 y latitud -70,015; altitud -13,887. los datos de precipitación mensual y anual están en función a las fechas de adquisición de imágenes satelitales (ver tabla 7). El año en que se recogió el valor más elevado fue 1994 (365,67 mm), y el registro inferior corresponde a 2008 (48,04 mm). La precipitación tiene periodos demarcados en la cual disminuye drásticamente en periodos definidos y posteriormente tiene una tendencia a aumentar su intensidad para volver a decaer y repetir los periodos (ver figura 27 y tabla 11).



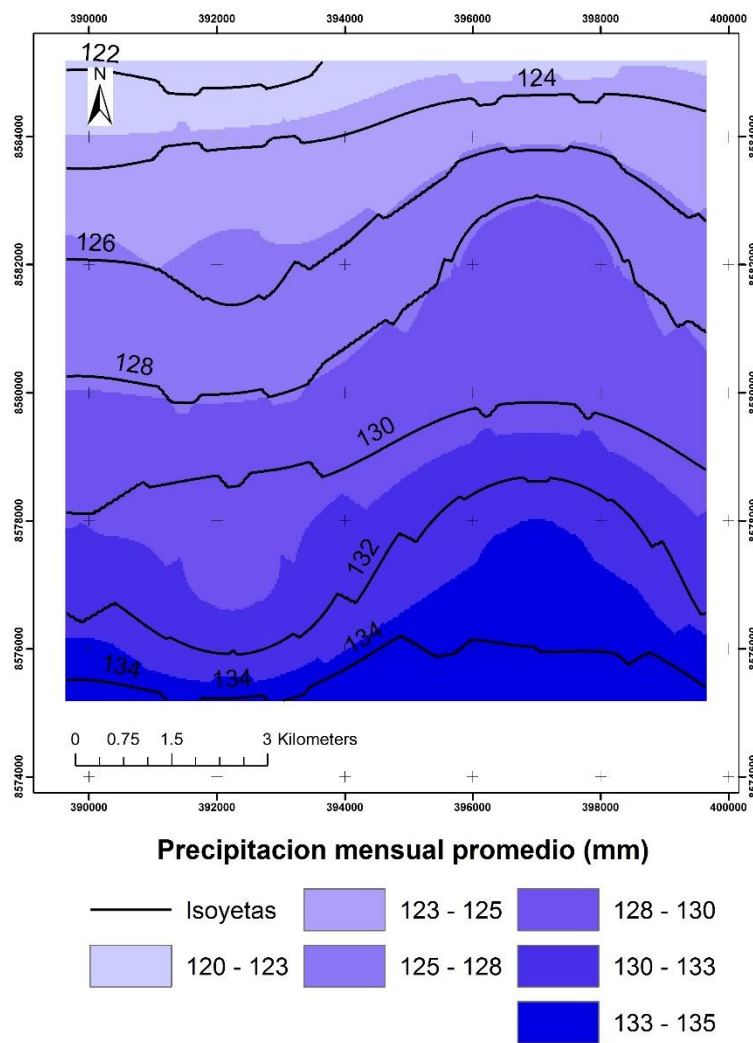
*Figura 27.* Precipitación mensual de las fechas establecidas según la adquisición de las imágenes satelitales.

Tabla 12. Cuadro de resumen con medidas estadísticas descriptivas de la precipitación en la Zona de La Pampa para el periodo comprendido 1985-2017.

Media	128,803242
Mediana	105,947
Desviación estándar	73,1312429
coeficiente de variación	56,7774859
Coeficiente de asimetría	1,48575369
Rango	317,633
Mínimo	48,041
Máximo	365,674
Suma	4250,507
Cuenta	33

**Precipitación mensual promedio para la zona de La Pampa en el periodo 1985-2017.**

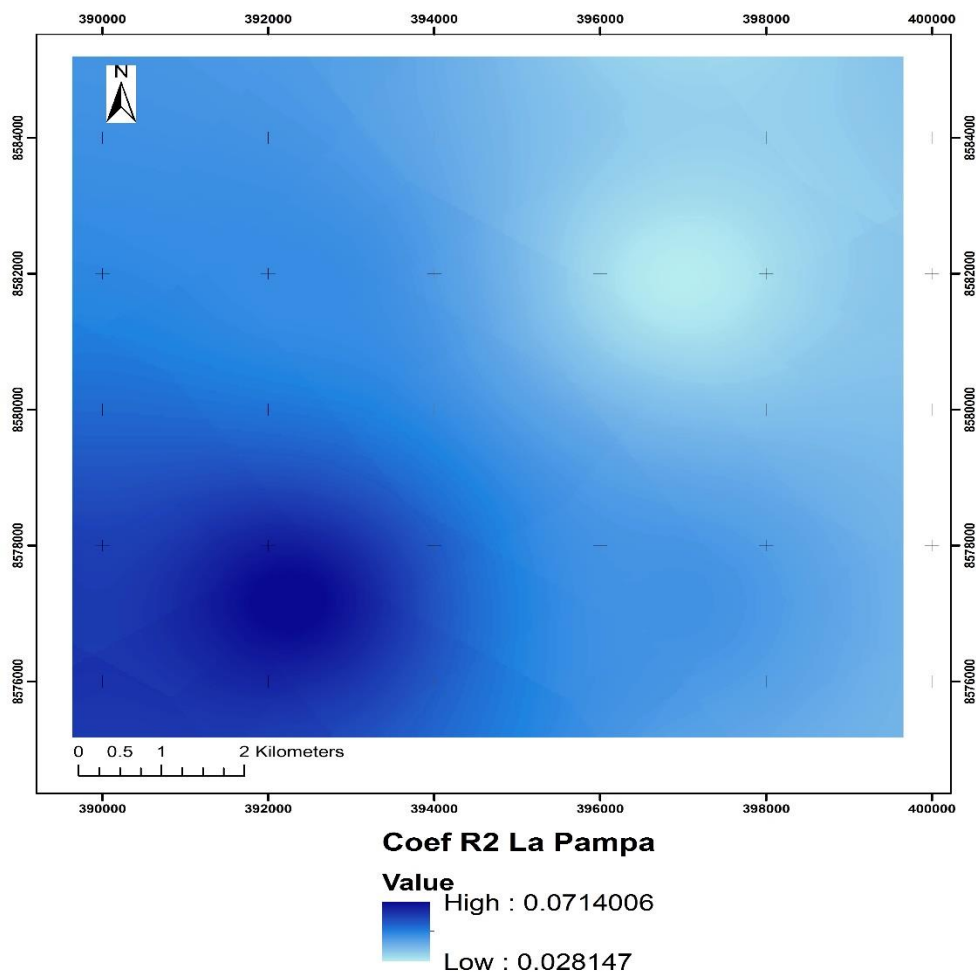
La precipitación mensual promedio que se aprecia va de acuerdo a la fecha de adquisición de las imágenes satelitales, las zonas que se encuentran al sur tienen mayor incidencia a precipitación, al norte de la zona de estudio se aprecia un descenso de la precipitación de manera estratificada; cabe destacar que la variación entre el valor mínimo y valor máximo es de 16 mm de diferencia.



*Figura 28.* Mapa de precipitación mensual promedio en la zona de estudio La Pampa en el periodo 1985-2017.

### **Análisis de coeficiente de Determinación $R^2$ para datos de precipitación en el periodo 1985-2017.**

El coeficiente de determinación  $R^2$  para la zona de estudio de La Pampa reporta un grado de relación de variables (Periodo de estudio, Precipitación) muestran valores insignificantes estadísticamente llegando a un valor máximo de 0,071.



*Figura 29.* Coeficiente de Determinación R2 para la zona de estudio de La Pampa en el periodo 1985-2017.

### **Análisis de tendencia Mann Kendall para datos de precipitación periodo 1985-2017.**

El análisis de tendencia Mann Kendall para la zona de estudio de La Pampa, nos muestra una distribución espacial de valores con tendencia positiva de la precipitación a lo largo de toda el área de estudio.



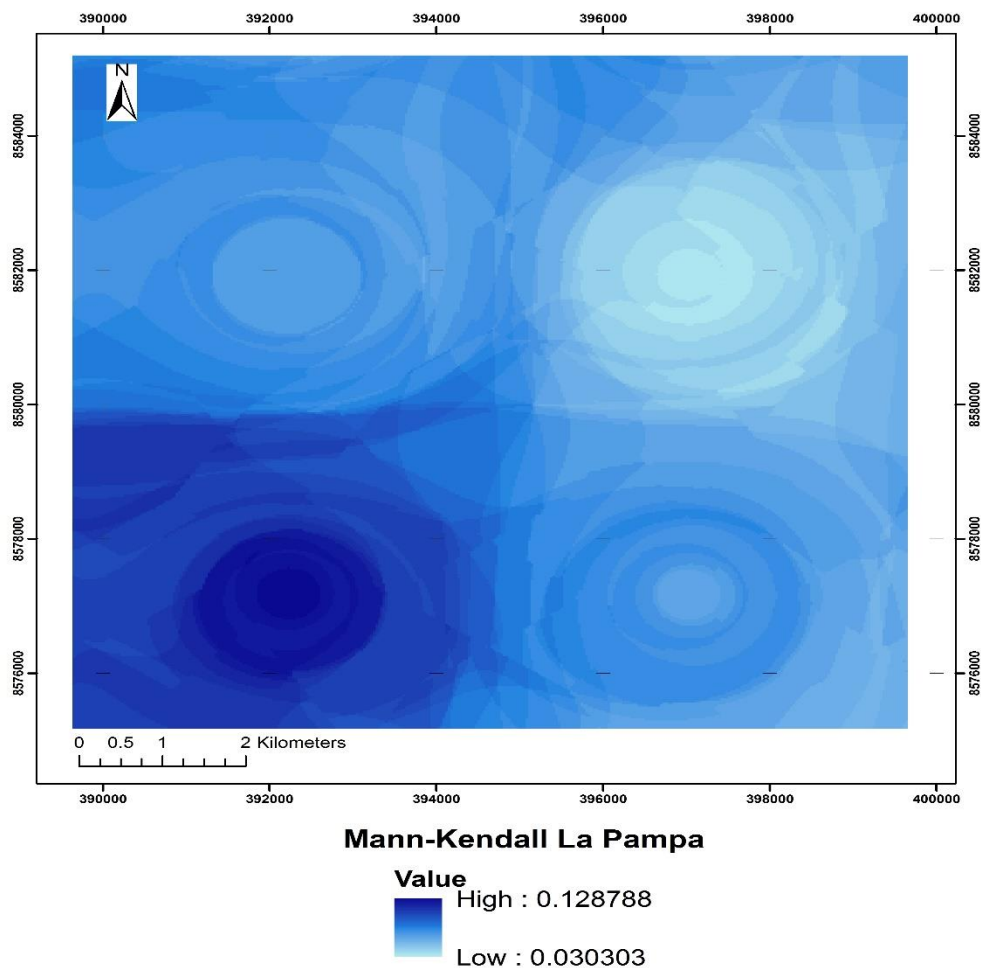
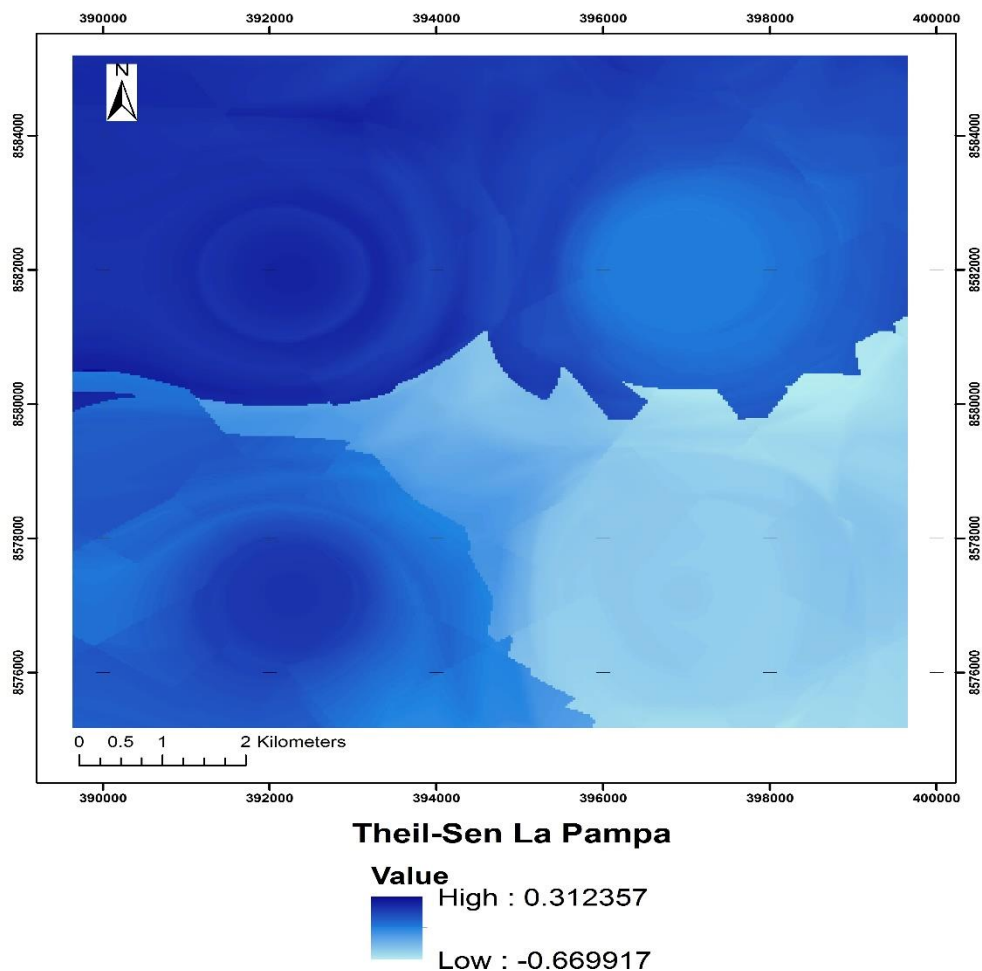


Figura 30. Test de tendencia Mann Kendall para la zona de La Pampa en el periodo de estudio 1985-2017.

### **Análisis del Test de magnitud Theil-Sen para datos de precipitación en el periodo de estudio 1985-2017.**

El análisis de magnitud de cambio de precipitación mediante el estimador de la pendiente Theil-Sen genero una imagen (figura 31) con la media de cambio de precipitación durante el periodo de estudio para cada pixel de la zona de estudio. Pixeles con valores positivos hasta un máximo de 0,31 indican un incremento en la precipitación; pixeles con valores mínimo de -0,67 indica una disminución de la precipitación. Los resultados para esta zona nos indica que la precipitación tiene una tendencia negativa para la parte sureste.

Las magnitudes de cambio positivo se concentraron espacialmente al noroeste de la zona de estudio, es donde se presenta mayores magnitudes de cambio positivo.



*Figura 31.* Magnitud de la pendiente Theil-Sen para la zona de La Pampa en el periodo de estudio 1985-2017.

#### 4.2 Análisis de tendencia temporal de los datos de vegetación

La dinámica de la vegetación durante un largo periodo de tiempo tiene un rol muy destacado en el monitoreo de la regeneración natural en áreas impactadas por minería aurífera, permitiendo dar un seguimiento constante de la dinámica de la regeneración por fuentes naturales y antrópicas.

El índice de vegetación mejorado por sus siglas en inglés (EVI), es el medio por el cual se da un seguimiento continuo de dinámica de la vegetación la cual se obtiene a partir de las bandas espectrales del rojo, infrarrojo cercano (IRC) y la banda azul, a las cuales se agregan constantes C1 y C2, que son coeficientes de corrección atmosférica que utilizan la información del canal azul para realizar una corrección del efecto de los aerosoles sobre el canal rojo,  $G=2,5$  es un factor de ganancia y L corresponde a un ajuste de la señal antecedente del dosel de las plantas cuyo valor es 1 (Huete et al. 2002; Ferreira et al. 2004; Roberts, Keller y Soares 2003; Xiao et al. 2005). El rango óptimo para discriminar la vegetación en la banda del rojo se sitúa en los 660 y 680 nm, la banda del IRC entre 840 y 880 nm y la banda del azul se sitúa en los 450 y 510 nm.

Los valores del EVI utilizados en esta tesis corresponden a productos obtenidos a partir de los sensores Landsat 5, 7, 8 y son la síntesis que se ha realizado eligiendo las mejores escenas en cuanto a resoluciones temporales, espaciales y espectrales para una mejor obtención en los resultados del EVI.

Existen varias maneras de comparar series temporales que contienen una distribución espacial, una de ellas es la obtención de la tendencia en el periodo de tiempo en el que los datos coinciden en temporadas de menor precipitación que son de julio a octubre.

En este subtítulo, se ha calculado el test de magnitud temporal Theil-Sen y su nivel de confianza mediante el test de tendencia Mann-Kendall (95 %) a partir de observaciones anuales con los datos obtenidos del índice de vegetación mejorado (EVI).

#### **4.2.1 Análisis de tendencia temporal de la vegetación en la zona Huepetuhe**

##### **Índice de vegetación mejorado (EVI) Promedio para la zona de Huepetuhe en el periodo 1985-2017.**

Antes de realizar la comparación de la tendencia temporal de los valores del EVI en la zona de estudio de Huepetuhe, es interesante observar el mapa que refleja

el EVI promedio en el periodo 1985 - 2017 y los perfiles temporales del comportamiento de la vegetación en ese intervalo de tiempo.

La distribución espacial del EVI promedio para la zona de Huepetuhe (Figura 32) entre 1985 y 2017 indica que en el noroeste y suroeste se concentran los valores promedio más elevados, que corresponden a las zonas de bosque y abundante vegetación, conforme nos desplazamos hacia el noreste y sureste, los valores del EVI van disminuyendo progresivamente y los tipos de vegetación van cambiando de zonas con vegetación hasta alcanzar las zonas de vegetación escasa y suelo desnudo.

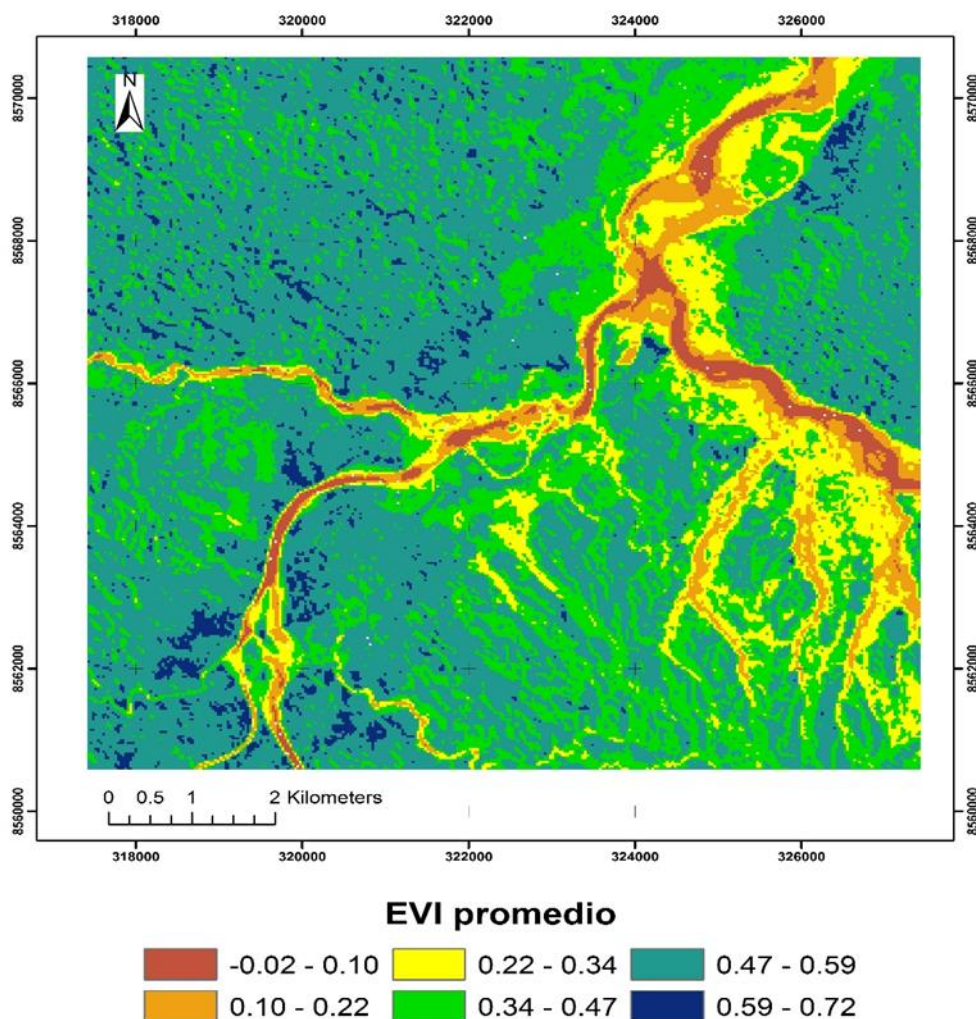


Figura 32. Mapa de EVI promedio para la zona de estudio Huepetuhe en el periodo 1985-2017.

En el perfil temporal (Figura 33) se observa cómo los valores del EVI tienen una tendencia de disminución de vegetación en todo el periodo de estudio. Los valores del EVI en años iniciales del periodo de estudio poseen una mayor densidad de vegetación, y puede observarse el declive de la densidad de vegetación por pérdida de bosque se produce a partir del año 2000 manteniendo una tendencia a pérdida de vegetación hasta el periodo final de la investigación, el resultado se asemeja a los estudios realizados por Alarcon et al. 2010; Asner et al. 2013; Rojas 2017, que indican que la pérdida de cobertura vegetal se debe al incremento de actividad minera aurífera, causando la disminución del índice de vegetación.

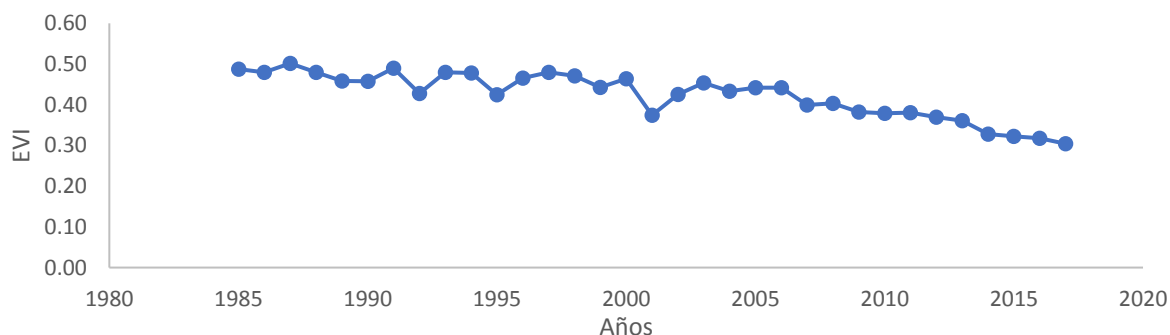
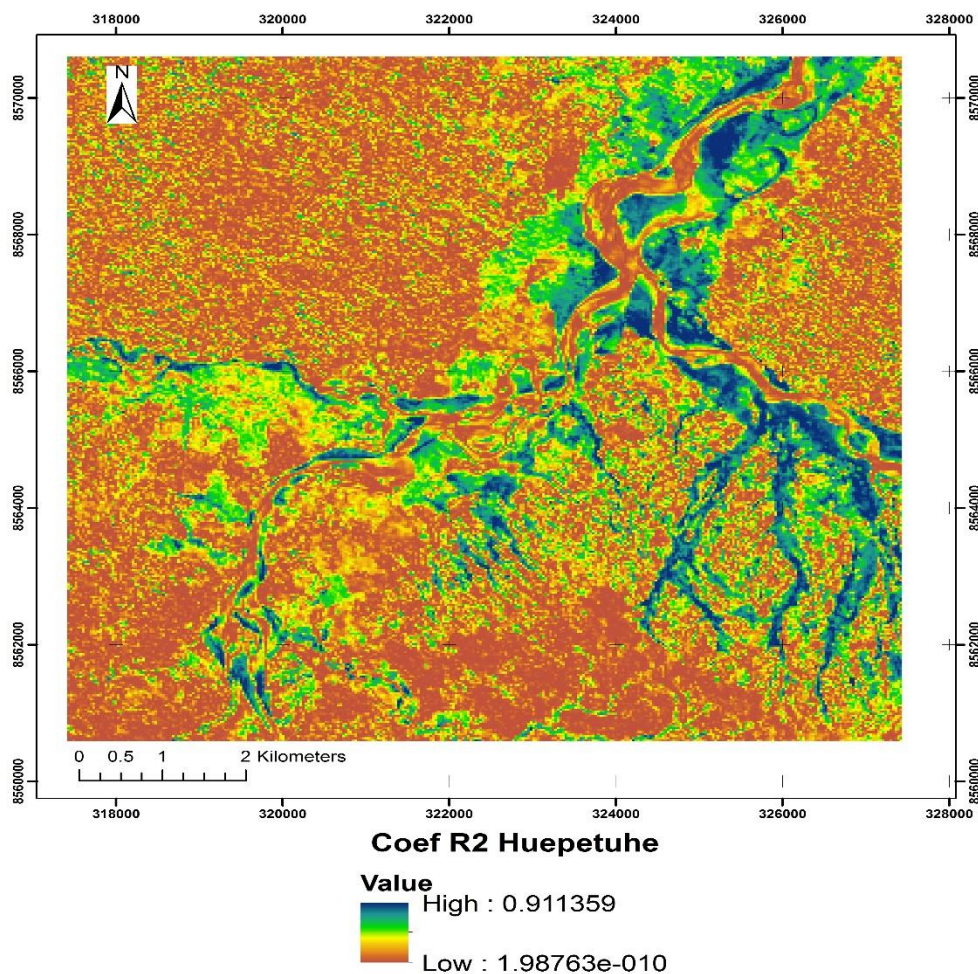


Figura 33. Perfil temporal del EVI promedio para la zona de estudio Huepetuhe en el periodo de estudio 1985-2017.

### **Análisis Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para la zona de Huepetuhe en el periodo 1985-2017.**

En la Figura 34, se muestran los resultados del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que es bastante elevado en los lugares próximos a cuerpos de agua donde se realiza con mayor intensidad la actividad minera aurífera, lo que genera una alta correlación a la pérdida de vegetación con un valor de  $R^2=0,91$ ; este resultado es de poco interés para la investigación realizada ya que se busca datos que

indiquen tendencia a ganancia de vegetación en zonas impactadas por actividad minera aurífera.



*Figura 34.* Coeficiente de Determinación R2 para la zona de estudio Huepetuhe en el periodo de estudio 1985-2017.

### **Análisis del test de significancia Mann Kendall para la zona de estudio de Huepetuhe en el periodo 1985-2017.**

El análisis de tendencia Mann Kendall para la zona de estudio de Huepetuhe, nos muestra una distribución espacial con tendencia positiva y negativa de la vegetación, las zonas de coloración azul son las que tienen mayor tendencia positiva de vegetación, las zonas de color marrón próximas a cuerpos de agua

tienen tendencia negativa de vegetación debido a que el recurso hídrico es primordial para realizar la actividad minera y las zonas de coloración verde amarilla son las que empiezan a tener tendencia positiva de vegetación (regeneración), los resultados se asemejan a los estudios realizados por Puig 2015; Maita 2015, que establecen que zonas con deforestación tienen tendencias negativas.

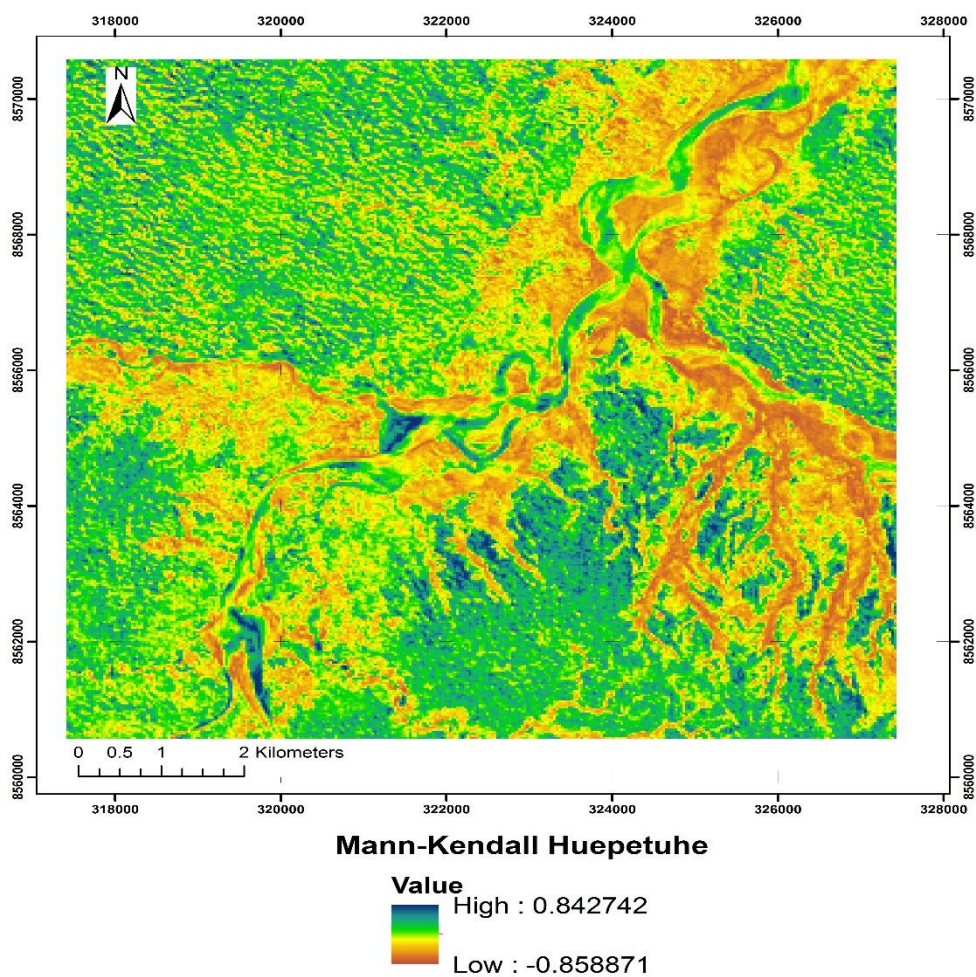


Figura 35. Test de Tendencia Mann Kendall para la zona de estudio Huetpetuhe en el periodo de estudio 1985-2017.

### **Análisis del test de magnitud Theil Sen para la zona de estudio de Huepetuhe en el periodo 1985-2017.**

A partir del producto obtenido Mann Kendall, se realizó el descarte de datos inferiores a un nivel de confianza del 95%, la cual genera las zonas con tendencia positivas y negativas que sirven como base para el análisis e interpretación de test de magnitud Theil Sen.

La magnitud obtenida del test de Theil Sen, indican que zonas de coloración amarilla son las principales áreas que fueron deforestadas y que con el paso del tiempo generaron cobertura vegetal, el área efectiva de deforestación según reportes del Ministerio del Ambiente 2017, indican que existe una superficie de 6 404,8 ha, los resultados obtenidos por el Theil-Sen indican que existe una superficie de 2 229,3 ha con tendencia positiva a regeneración, los resultados se asemejan al estudio realizado por Puig Polo 2015, donde indica que las áreas que presentan tendencia positiva del test Theil-Sen son superficies con empiezan a recuperarse con el paso del tiempo.



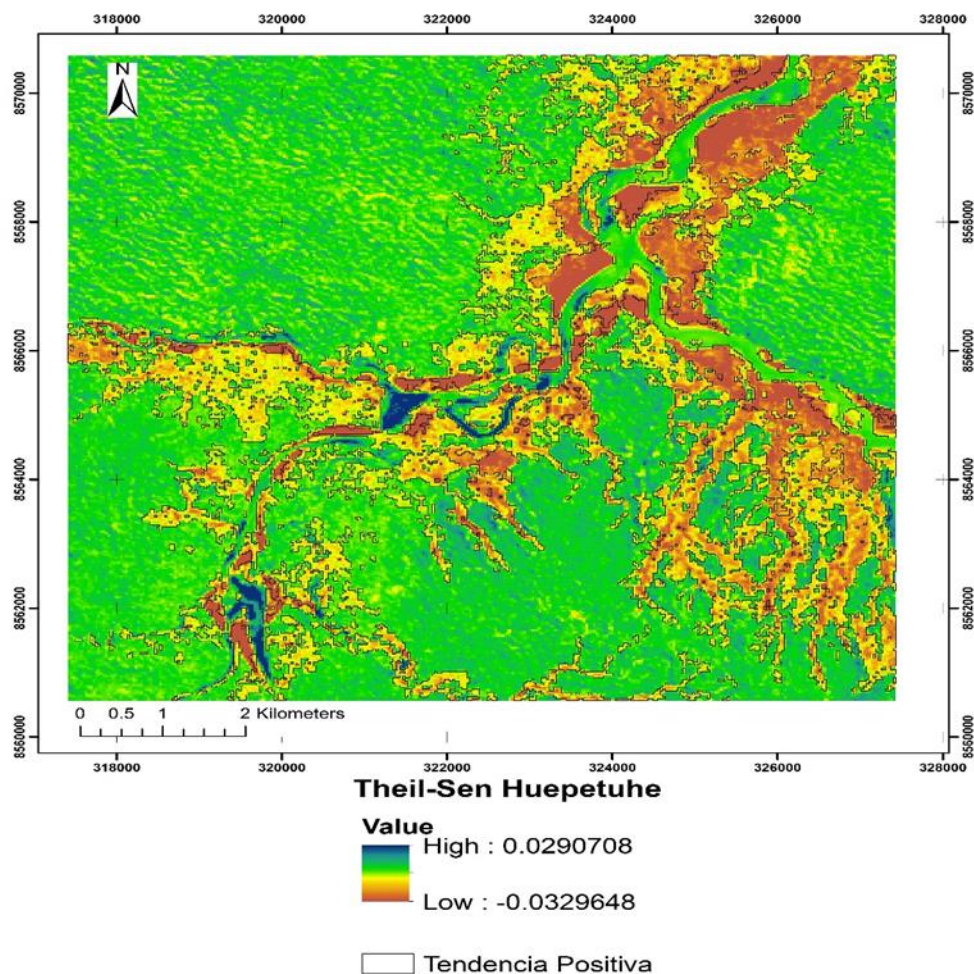


Figura 36. Magnitud de la pendiente Theil Sen para la zona de estudio Huepetuhe en el periodo 1985-2017.

#### 4.2.2 Análisis de tendencia temporal de la vegetación en la zona Delta

##### Índice de vegetación mejorado (EVI) Promedio para la zona de Delta en el periodo 1985-2017.

Antes de realizar la comparación de la tendencia temporal de los valores del EVI en la zona de estudio de Delta, es interesante observar el mapa que refleja el EVI promedio en el periodo 1985-2017 y los perfiles temporales del comportamiento de la vegetación en ese intervalo de tiempo.

La distribución espacial del EVI promedio para la zona de Delta (Figura 37) entre 1985 y 2017 indica que en el noroeste y suroeste se concentran los valores promedio más elevados, que corresponden a las zonas de bosque y abundante vegetación, conforme nos desplazamos hacia el noreste y sureste, los valores del EVI van disminuyendo progresivamente y los tipos de vegetación van cambiando de zonas con vegetación hasta alcanzar las zonas de vegetación escasa y suelo desnudo.

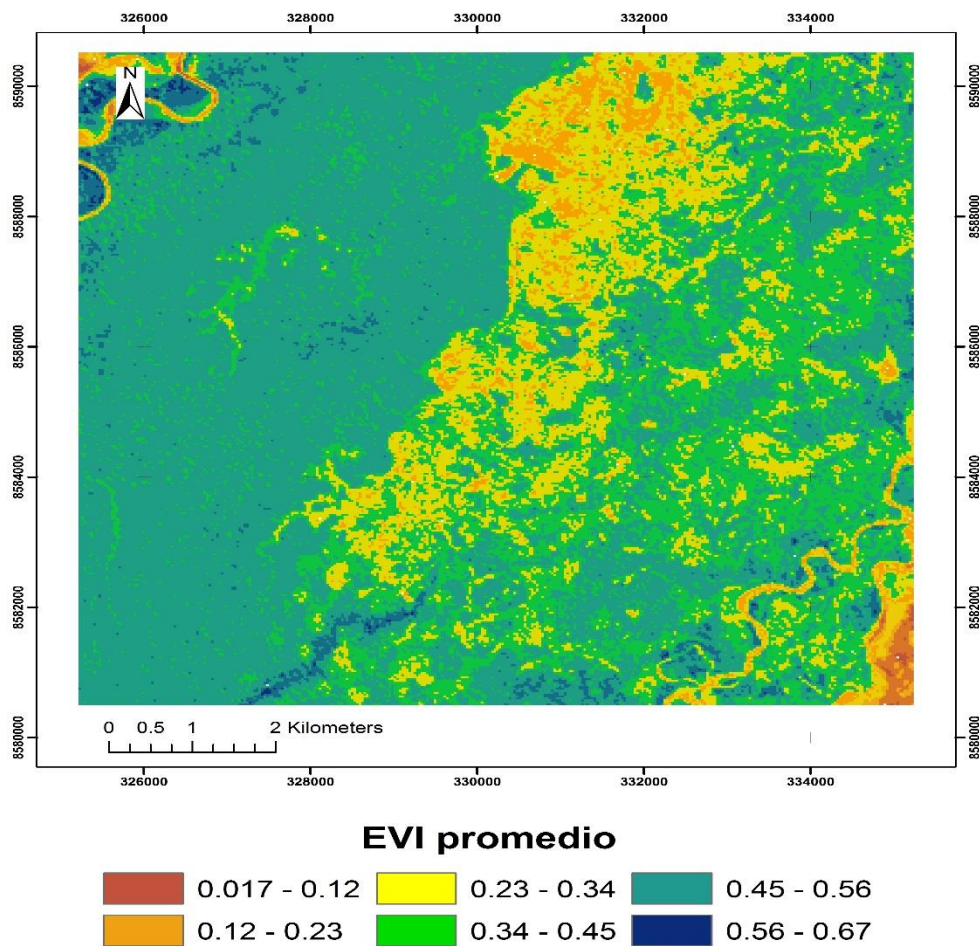
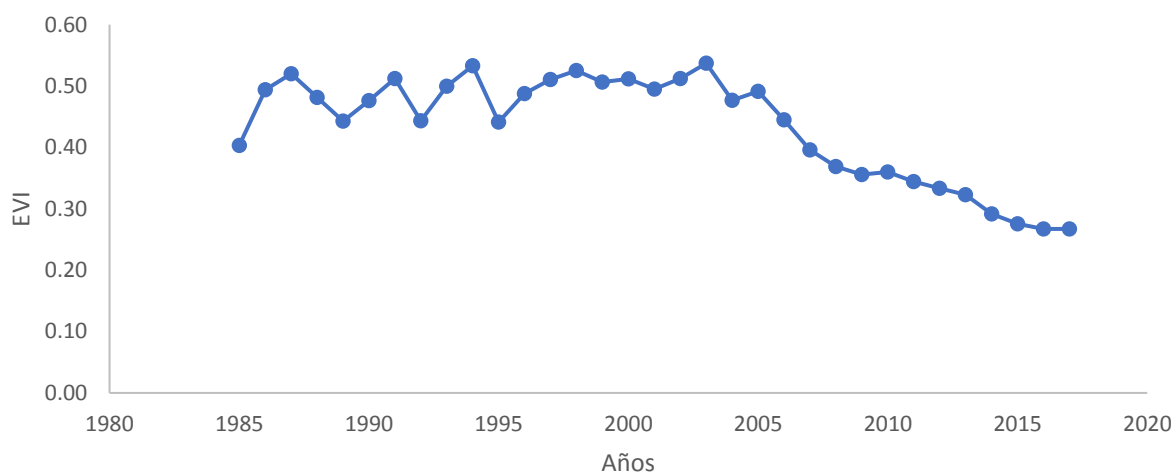


Figura 37. Mapa de EVI promedio para la zona de estudio Delta en el periodo 1985-2017.

En el perfil temporal (Figura 38) se observa cómo los valores del EVI tienen una tendencia de disminución de vegetación en todo el periodo de estudio.

Los valores del EVI en años iniciales del periodo de estudio poseen una mayor densidad vegetación que fluctúan en 0,4 a 0,5 a media que avanza el tiempo puede observarse el declive de la densidad de vegetación por perdida de bosque se produce a partir del año 2005 manteniendo una tendencia negativa debido a la perdida de vegetación hasta el periodo final de la investigación. Cabe destacar que los datos mostrados son el resultado del EVI promedio en función la capa de deforestación obtenida del geo-servidor MINAM, el resultado se asemeja a los estudios realizados por Alarcon et al. 2010; Asner et al. 2013; Rojas 2017, que indican que la perdida de cobertura vegetal se debe al incremento de actividad minera aurífera, causando la disminución del índice de vegetación.

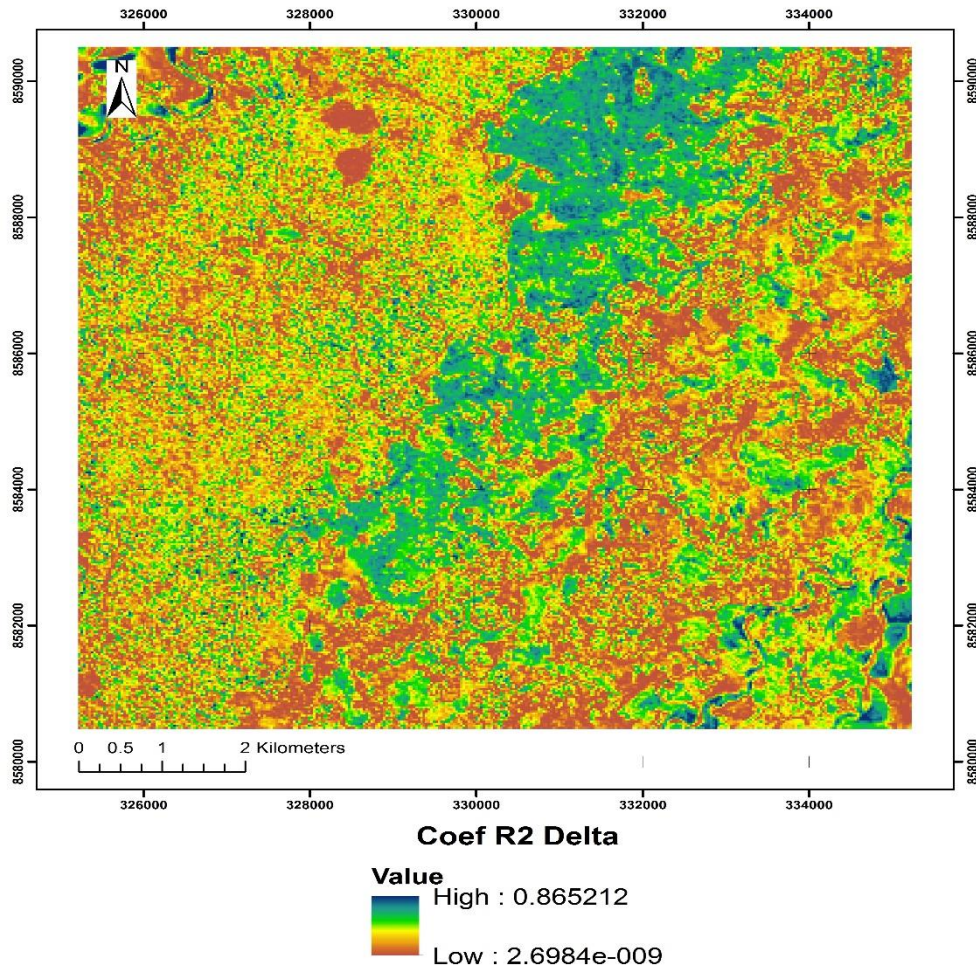


*Figura 38.* Perfil temporal del EVI promedio para la zona de estudio Delta en el periodo de estudio 1985-2017.

### **Análisis Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para la zona de Delta en el periodo 1985-2017.**

En la Figura 39, se muestran los resultados del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), se aprecia una correlación alta en los lugares próximos a cuerpos de agua donde se realiza con mayor intensidad la actividad minera aurífera, lo que genera una alta correlación a la pérdida de vegetación con un valor de  $R^2=0,91$ ; este resultado es

de poco interés para la investigación realizada ya que se busca datos que indiquen tendencia a ganancia de vegetación en zonas impactadas por actividad minera aurífera.

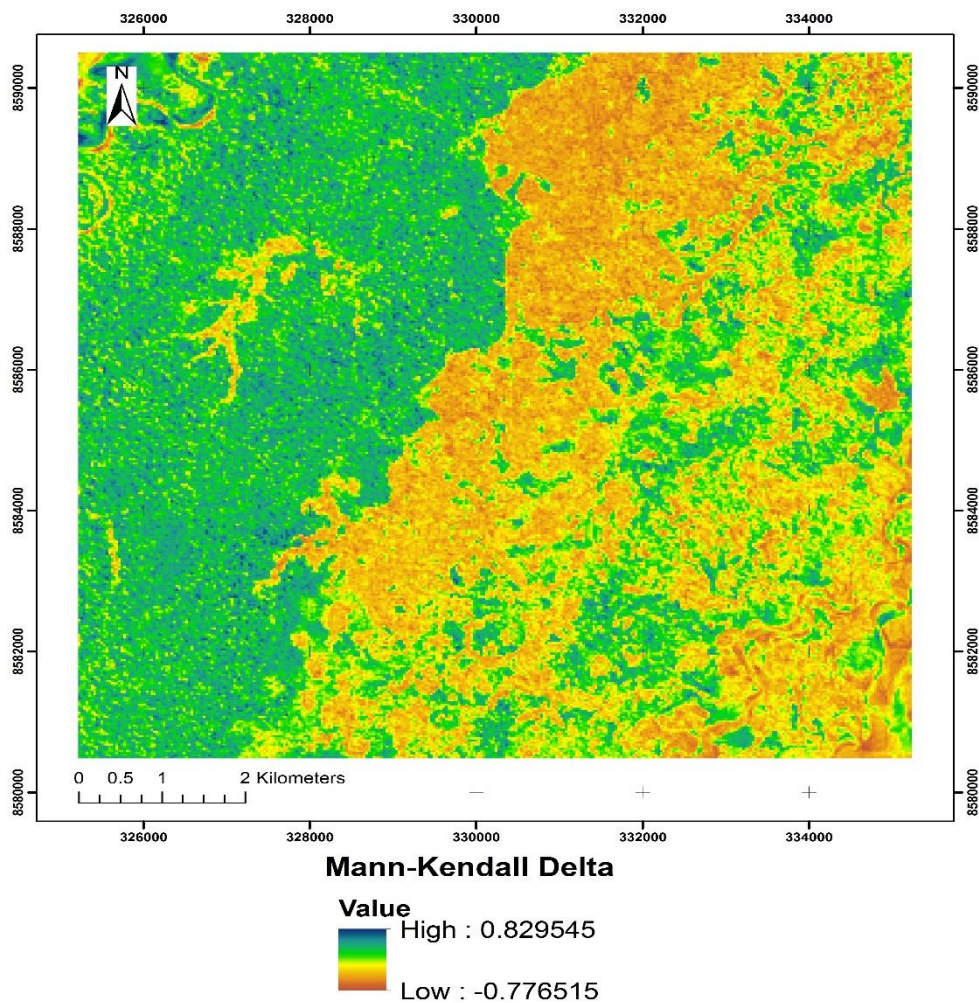


*Figura 39.* Coeficiente de Determinación R2 para la zona de estudio Delta en el periodo de estudio 1985-2017.

### **Análisis del test de significancia Mann Kendall para la zona de estudio de Delta en el periodo 1985-2017.**

El análisis de tendencia Mann Kendall para la zona de estudio de Delta, nos muestra una distribución espacial con tendencia positiva y negativa de la vegetación, las zonas de coloración azul son las que tienen mayor tendencia

positiva de vegetación, las zonas de color marrón que están próximas a cuerpos de agua tienen tendencia negativa de vegetación y las zonas de coloración verde amarilla son las que empiezan a tener tendencia positiva de vegetación (regeneración), los resultados se asemejan a los estudios realizados por Puig 2015; Maita 2015, que establecen que zonas con deforestación tienen tendencias negativas de la vegetación.



*Figura 40.* Test de Tendencia Mann Kendall para la zona de estudio Delta en el periodo 1985-2017.

### **Análisis del test de magnitud Theil Sen para la zona de estudio de Delta en el periodo 1985-2017.**

A partir del producto obtenido Mann Kendall, se realizó el descarte de datos inferiores a un nivel de confianza del 95%, la cual genera las zonas con tendencia positivas y negativas que sirven como base para el análisis e interpretación de test de magnitud Theil Sen.

La magnitud obtenida del test de Theil Sen, indican que zonas de coloración amarilla son las principales áreas que fueron deforestadas y que con el paso del tiempo generaron cobertura vegetal, el área efectiva de deforestación según reportes del Ministerio del Ambiente 2017, indica que existe una superficie de 6 764,3 ha, los resultados obtenidos por el Theil-Sen indican que existe una superficie de 3 639,5 ha con tendencia positiva a regeneración, los resultados se asemejan al estudio realizado por Puig Polo 2015, donde indica que las áreas que presentan tendencia positiva del test Theil-Sen son superficies con empiezan a recuperarse con el paso del tiempo.

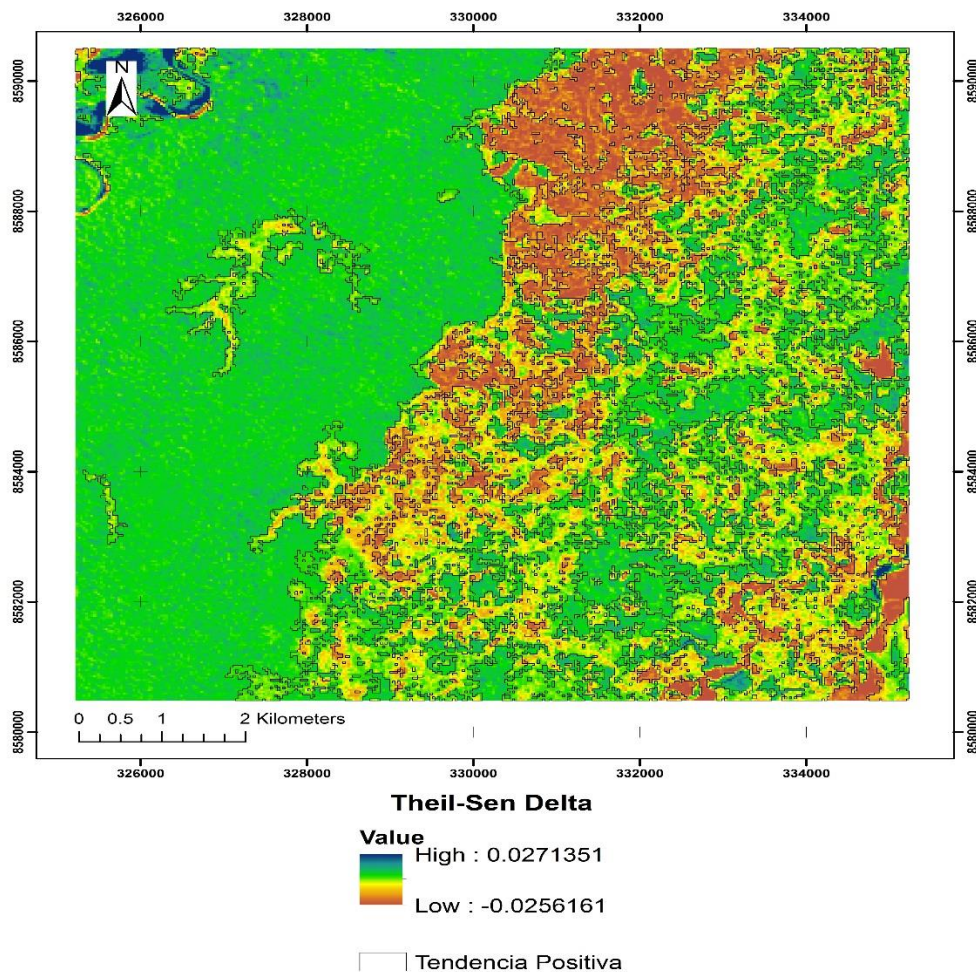


Figura 41. Magnitud de la pendiente Theil Sen para la zona de estudio Delta en el periodo de estudio 1985-2017.

#### 4.2.3 Análisis de tendencia temporal de la vegetación en la zona Dos de Mayo

##### Índice de vegetación mejorado (EVI) Promedio para la zona de Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.

Antes de realizar la comparación de la tendencia temporal de los valores del EVI en la zona de estudio de Dos de Mayo, es interesante observar el mapa que refleja el EVI promedio en el periodo 1985-2017 y los perfiles temporales del comportamiento de la vegetación en ese intervalo de tiempo.

La distribución espacial del EVI promedio para la zona de Dos de Mayo (Figura 42) entre 1985 y 2017 indica que en el noroeste y sureste se concentran los valores promedio del EVI más elevados, que corresponden a las zonas de bosque y abundante vegetación, conforme nos desplazamos hacia el noreste, los valores del EVI van disminuyendo progresivamente y los tipos de vegetación van cambiando de zonas con vegetación hasta alcanzar las zonas de vegetación escasa y suelo desnudo, los valores EVI promedio más bajos se encuentran próximos a los cuerpos de agua que tienen una coloración rojiza.

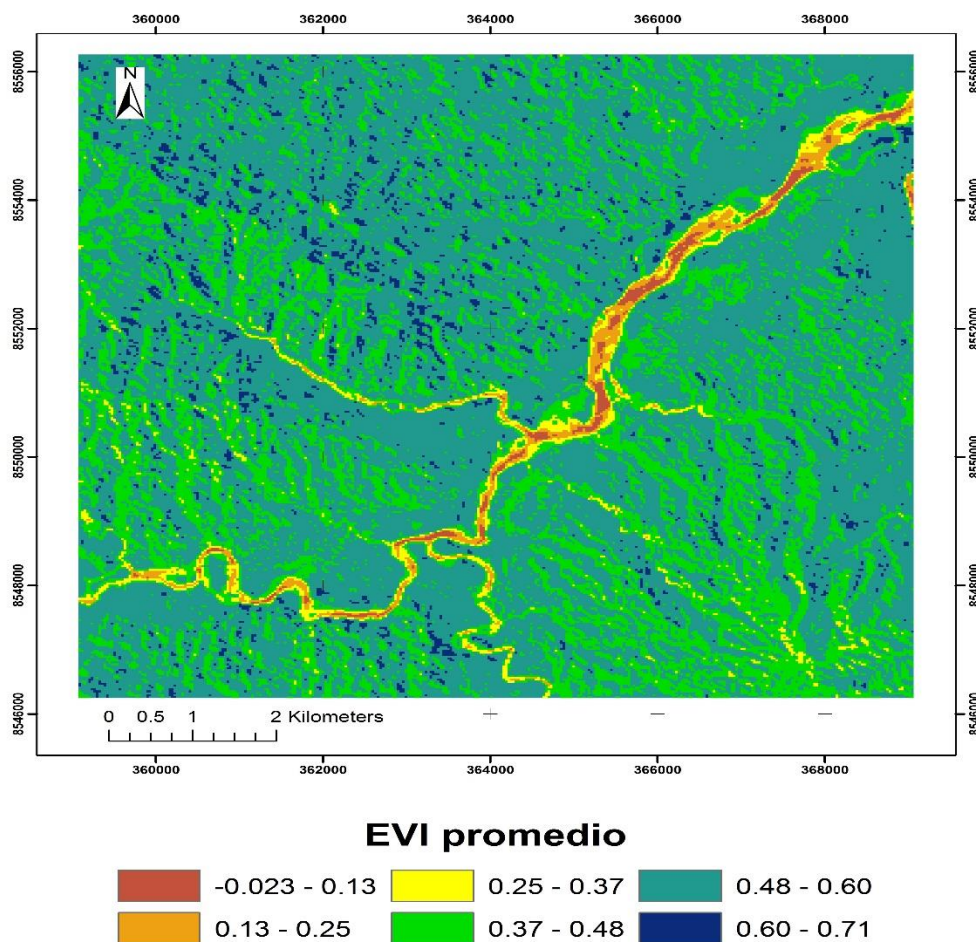


Figura 42. Mapa de EVI promedio para la zona de estudio Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.



En el perfil temporal (Figura 43) se observa cómo los valores del EVI promedio tienen una fluctuación entre 0,52 y 0,33. Los valores del EVI en el periodo 1985-2005 se mantienen altos mostrando vegetación vigorosa o con alta cobertura de vegetación, y puede observarse el declive de la densidad de vegetación por pérdida de bosque se produce posterior al año 2005 manteniendo una tendencia a pérdida de vegetación hasta el periodo final de la investigación, el resultado se asemeja a los estudios realizados por Alarcon et al. 2010; Asner et al. 2013; Rojas 2017, que indican que la pérdida de cobertura vegetal se debe al incremento de actividad minera aurífera, siendo una de las causas de la disminución del índice de vegetación.

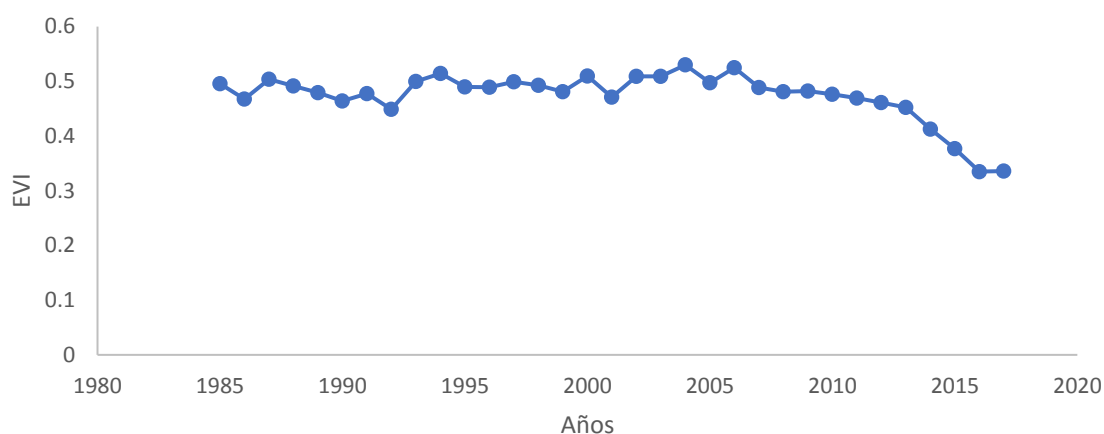
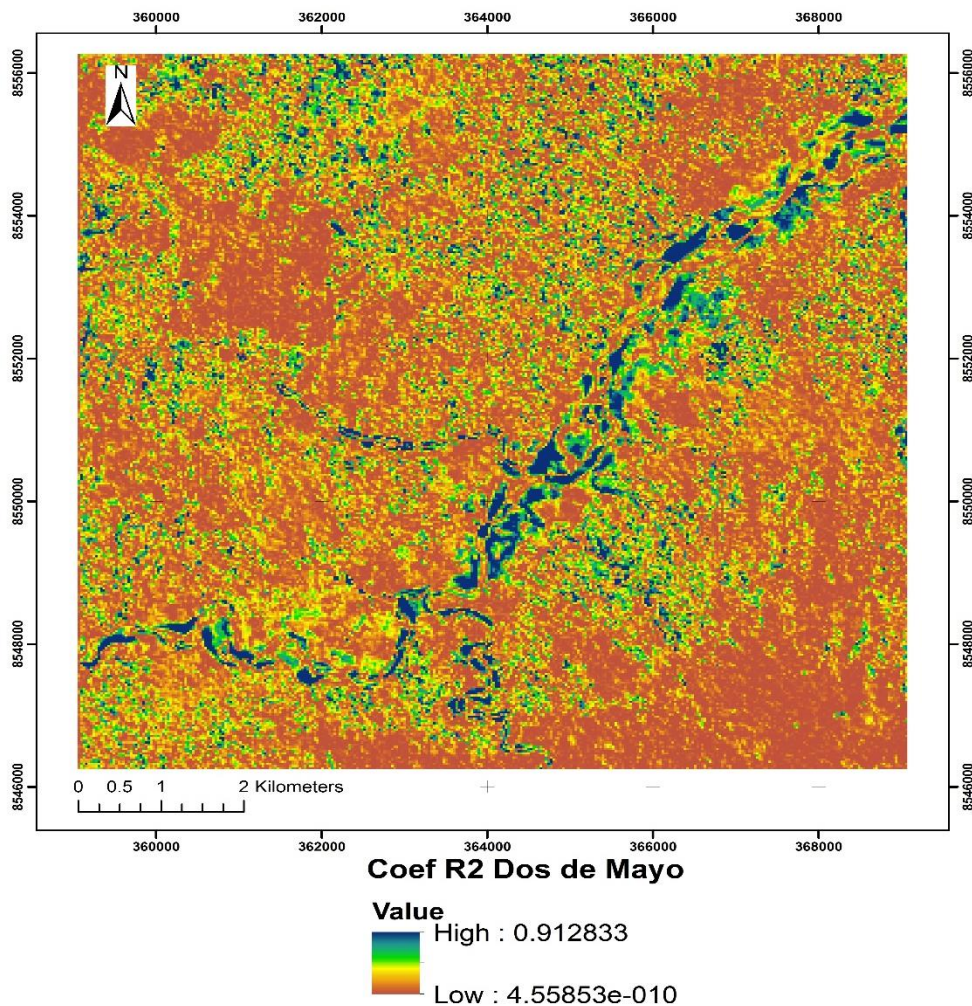


Figura 43. Perfil temporal del EVI promedio para la zona de estudio Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.

### **Análisis Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para la zona de Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.**

En la Figura 44, se muestran los resultados del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que es bastante elevado en los lugares próximos a cuerpos de agua donde se realiza con mayor intensidad la actividad minera aurífera, lo que genera una alta correlación a la pérdida de vegetación con un valor de  $R^2=0,91$ ; este resultado es de poco interés para la investigación realizada ya que se busca datos que

indiquen tendencia a ganancia de vegetación en zonas impactadas por actividad minera aurífera.



*Figura 44.* Coeficiente de Determinación  $R^2$  para la zona de estudio Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.

### **Análisis del test de significancia Mann Kendall para la zona de estudio de Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.**

El análisis de tendencia Mann Kendall para la zona de estudio de Dos de Mayo, nos muestra una distribución espacial con tendencia positiva y negativa de la vegetación, las zonas de coloración azul son las que tienen mayor tendencia positiva de vegetación, las zonas de color marrón próximas a cuerpos de agua

tienen tendencia negativa de vegetación y las zonas de coloración verde amarilla son las que empiezan a tener tendencia positiva de vegetación (regeneración), los resultados se asemejan a los estudios realizados por Puig 2015; Maita 2015, que establecen que zonas con deforestación tienen tendencias negativas.

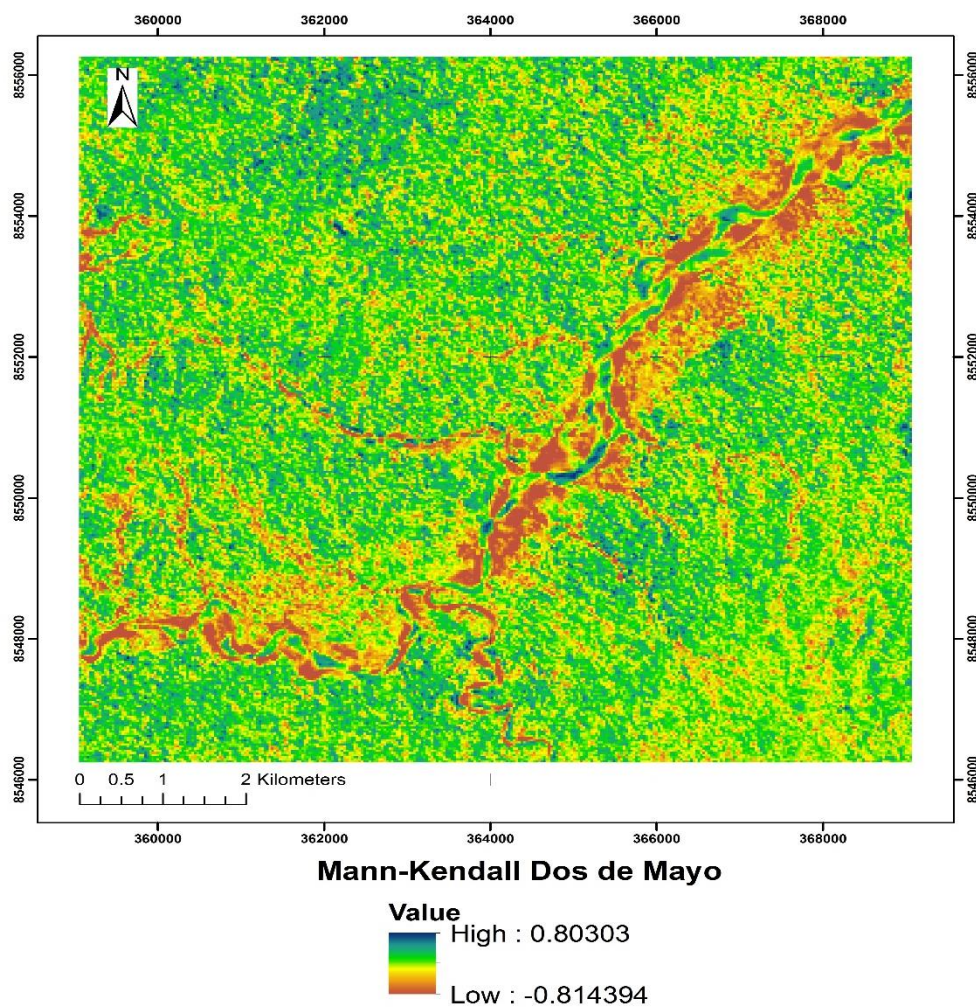


Figura 45. Test de Tendencia Mann Kendall para la zona de estudio Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.

### **Análisis del test de magnitud Theil Sen para la zona de estudio de Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.**

A partir del producto obtenido Mann Kendall, se realizó el descarte de datos inferiores a un nivel de confianza del 95%, la cual genera las zonas con tendencia positivas y negativas que sirven como base para el análisis e interpretación de test de magnitud Theil Sen.

La magnitud obtenida del test de Theil Sen, indican que zonas de coloración amarilla son las principales áreas que fueron deforestadas y que con el paso del tiempo generaron cobertura vegetal, el área efectiva de deforestación según reportes del Ministerio del Ambiente 2017, indican que existe una superficie de 1 921,2 ha, los resultados obtenidos por el Theil-Sen indican que existe una superficie de 976,2 ha con tendencia positiva a regeneración , los resultados obtenidos por el Theil-Sen indican que existe una superficie de 2 229,3 ha con tendencia positiva a regeneración, los resultados se asemejan al estudio realizado por Puig Polo 2015, donde indica que las áreas que presentan tendencia positiva del test Theil-Sen son superficies con empiezan a recuperarse con el paso del tiempo.

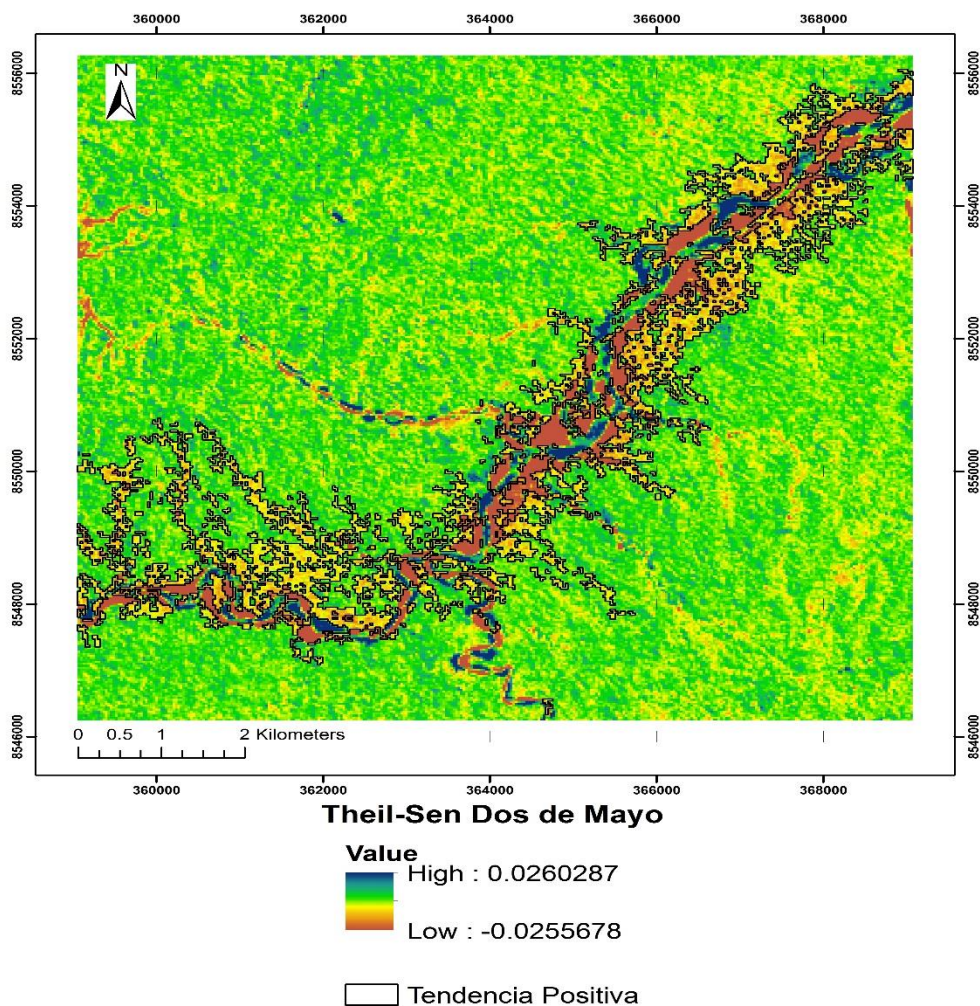


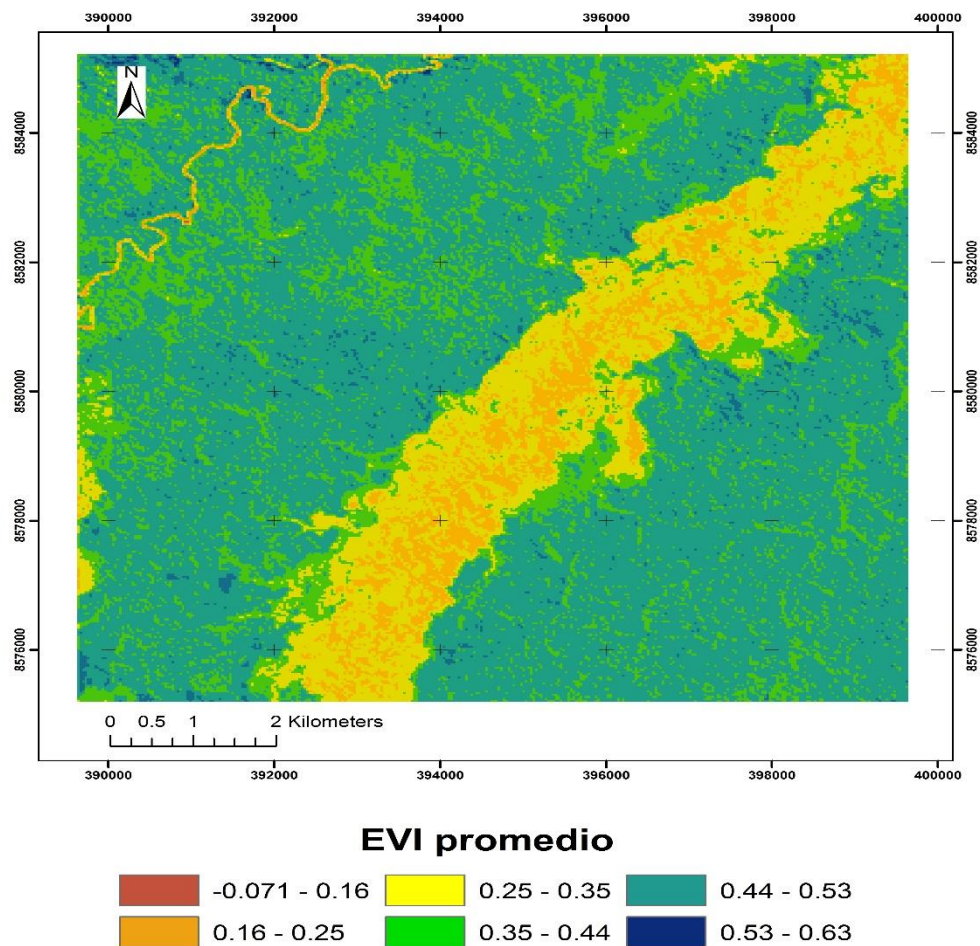
Figura 46. Magnitud de la pendiente Theil Sen para la zona de estudio Dos de Mayo en el periodo 1985-2017.

#### 4.2.4 Análisis de tendencia temporal de la vegetación de la zona La Pampa

##### Índice de vegetación mejorado (EVI) Promedio para la zona de La Pampa en el periodo 1985-2017.

Antes de realizar la comparación de la tendencia temporal de los valores del EVI en la zona de estudio de la Pampa, es interesante observar el mapa que refleja el EVI promedio en el periodo 1985-2017 y los perfiles temporales del comportamiento de la vegetación en ese intervalo de tiempo.

La distribución espacial del EVI promedio para la zona de la Pampa (Figura 47) entre 1985 y 2017 muestra los valores más elevados bien demarcados y se encuentran fuera del área de extracción de mineral aurífero, se aprecia con gran claridad una franja perpendicularmente de sur a norte que muestra los valores más bajos, siendo zonas de escasa vegetación o suelo desnudo.



*Figura 47.* Mapa de EVI promedio para la zona de estudio La Pampa en el periodo 1985-2017. Fuente: Elaboración propia.

En el perfil temporal (Figura 48) se observa cómo los valores del EVI tienen una tendencia de disminución de vegetación en todo el periodo de estudio. Los valores del EVI en años iniciales del periodo de estudio poseen una mayor densidad vegetación, y puede observarse el declive de la densidad de vegetación por pérdida de bosque se produce a partir del año 2008 manteniendo una

tendencia a pérdida de vegetación hasta el periodo final de la investigación, el resultado se asemeja a los estudios realizados por Alarcon et al. 2010; Asner et al. 2013; Rojas 2017, que indican que la pérdida de cobertura vegetal se debe al incremento de actividad minera aurífera, causando la disminución del índice de vegetación.

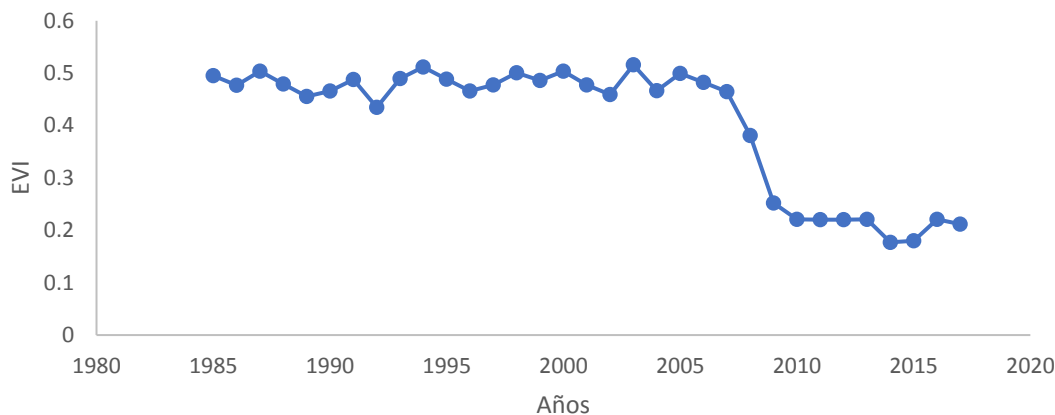
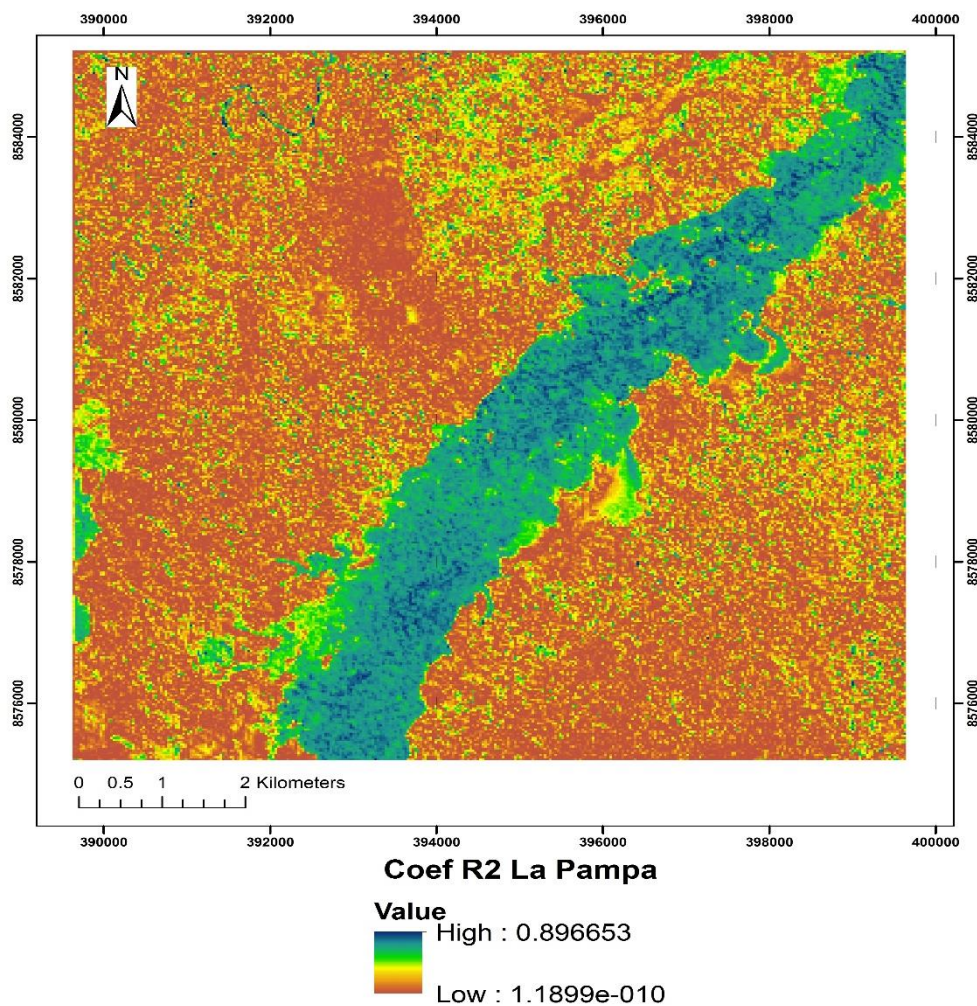


Figura 48. Perfil temporal del EVI promedio para la zona de estudio La Pampa en el periodo de estudio 1985-2017.

### **Análisis Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para la zona de la Pampa en el periodo 1985-2017.**

En la Figura 49, se muestran los resultados del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que es bastante elevado en los lugares próximos a cuerpos de agua donde se realiza con mayor intensidad la actividad minera aurífera, lo que genera una alta correlación a la pérdida de vegetación con un valor de  $R^2=0,91$ ; este resultado es de poco interés para la investigación realizada ya que se busca datos que indiquen tendencia a ganancia de vegetación en zonas impactadas por actividad minera aurífera.



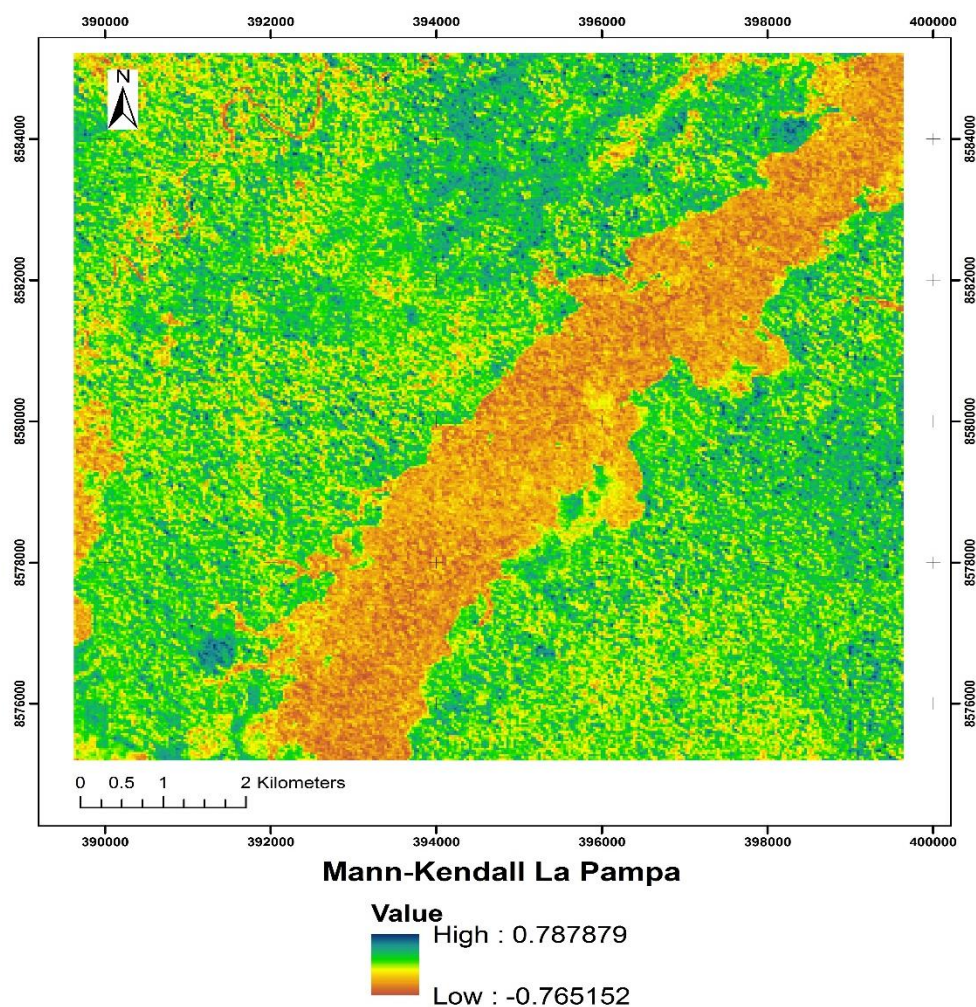
*Figura 49.* Coeficiente de Determinación  $R^2$  para la zona de estudio La Pampa en el periodo de estudio 1985-2017.

### **Análisis del test de significancia Mann Kendall para la zona de estudio de la Pampa en el periodo 1985-2017.**

El análisis de tendencia Mann Kendall para la zona de estudio de la Pampa, nos muestra una distribución espacial con tendencia positiva y negativa de la vegetación, las zonas de coloración azul son las que tienen mayor tendencia positiva de vegetación, las zonas de color marrón próximas a cuerpos de agua tienen tendencia negativa de vegetación y las zonas de coloración verde amarilla son las que empiezan a tener tendencia positiva de vegetación (regeneración),



los resultados se asemejan a los estudios realizados por Puig 2015; Maita 2015, que establecen que zonas con deforestación tienen tendencias negativas.

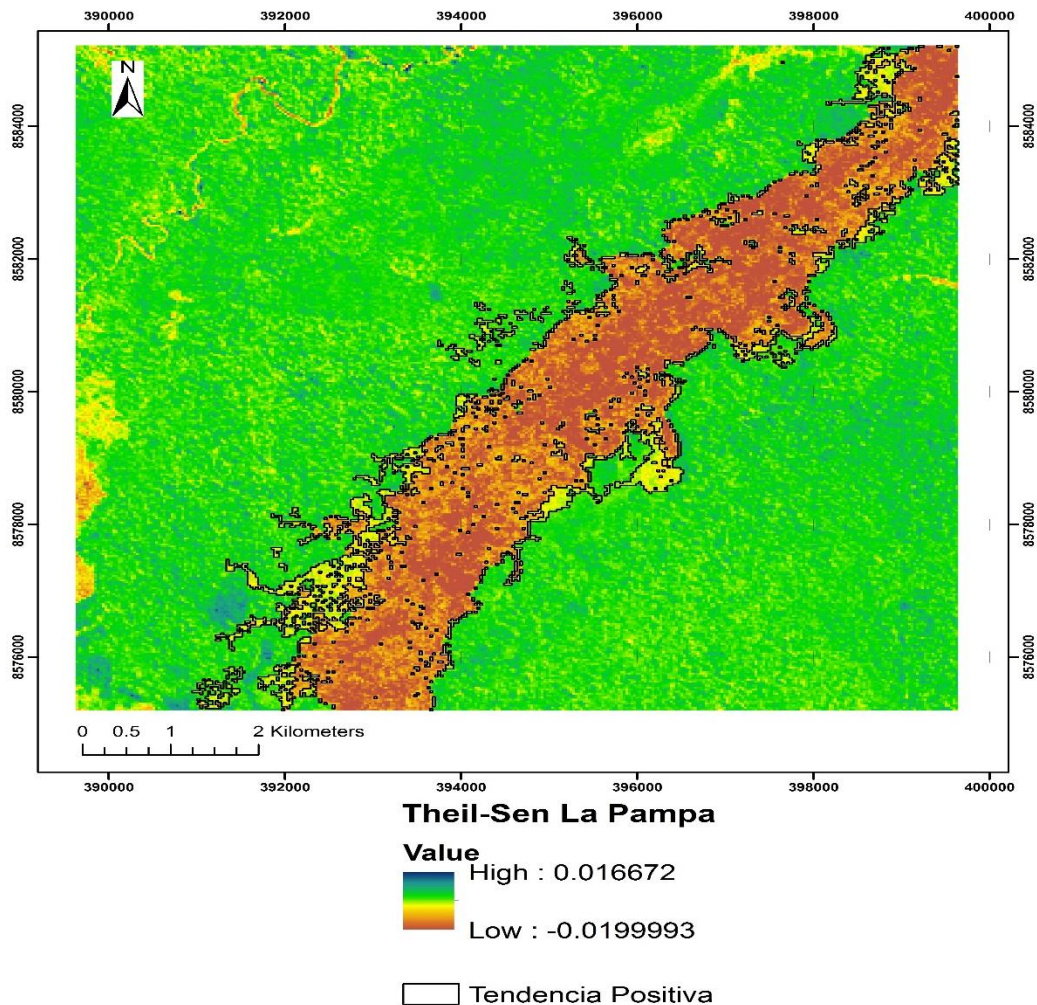


*Figura 50.* Test de tendencia Mann Kendall para la zona de estudio La Pampa en el periodo de estudio 1985-2017.

### **Análisis del test de magnitud Theil Sen para la zona de estudio de la Pampa en el periodo 1985-2017.**

A partir del producto obtenido Mann Kendall, se realizó el descarte de datos inferiores a un nivel de confianza del 95%, la cual genera las zonas con tendencia positivas y negativas que sirven como base para el análisis e interpretación de test de magnitud Theil Sen.

La magnitud obtenida del test de Theil Sen, indican que zonas de coloración amarilla son las principales áreas que fueron deforestadas y que con el paso del tiempo generaron cobertura vegetal, el área efectiva de deforestación según reportes del Ministerio del Ambiente 2017, indican que existe una superficie de 4 280,1 ha, los resultados obtenidos por el Theil-Sen indican que existe una superficie de 421,5 ha con tendencia positiva a regeneración.



*Figura 51.* Magnitud de la pendiente Theil Sen para la zona de estudio La Pampa en el periodo de estudio 1985-2017.

### **4.3 Comparación del régimen de lluvias y la evolución de la vegetación**

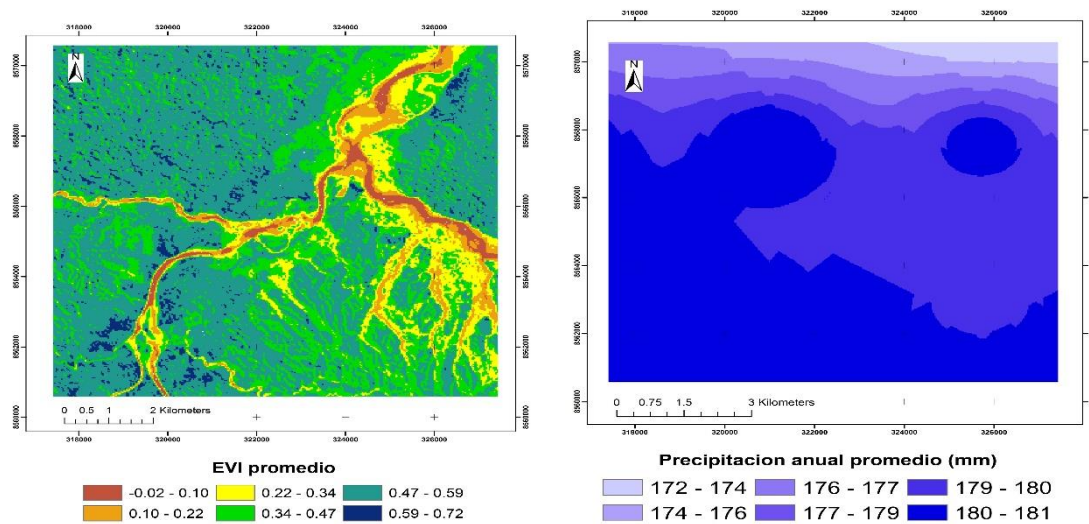
El corredor minero en Madre de Dios es la región donde se han evidenciado las mayores variaciones de vegetación en las últimas tres décadas, y su estudio desde una perspectiva de variabilidad temporal es el objeto de esta tesis.

La posibilidad de monitorear la dinámica de la vegetación se debe, en gran medida, a los avances en el campo de la teledetección. La disponibilidad de datos desde principios de la década de 1980, cada vez con mejores resoluciones espaciales, espectrales y temporales, ha permitido conocer el comportamiento de las precipitaciones y la dinámica de la vegetación; aunque es importante advertir sobre sus limitaciones, especialmente relacionadas con la observación de la vegetación. La forma más usual de estudiarla es a través de los índices de vegetación, para esta investigación se utilizará el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) que se ajusta mejor a suelos desnudos y con altos niveles de reflectancia, que permite determinar el estado de la vegetación.

En este subtítulo se pretende profundizar en la relación existente entre vegetación y precipitación en las cuatro zonas de estudio, durante el periodo de tiempo planteado en la investigación. Y una de las primeras preguntas que a uno se le ocurre es la siguiente: si existe una relación lineal entre el EVI y la precipitación.

#### **4.3.1 Relación espacial y temporal entre el EVI y la Precipitación en la zona de estudio Huepetuhe**

Como primer paso se ha hecho una comparación visual entre el mapa del promedio del EVI y la precipitación promedio entre 1985 y 2017. Estos mapas guardan una buena correspondencia geográfica respecto a sus valores máximo y mínimo (Figura 52). Los valores máximos del EVI y de precipitación se producen en la zona suroeste del área de estudio; los valores mínimos ocupan las zonas próximas a cuerpos de agua.



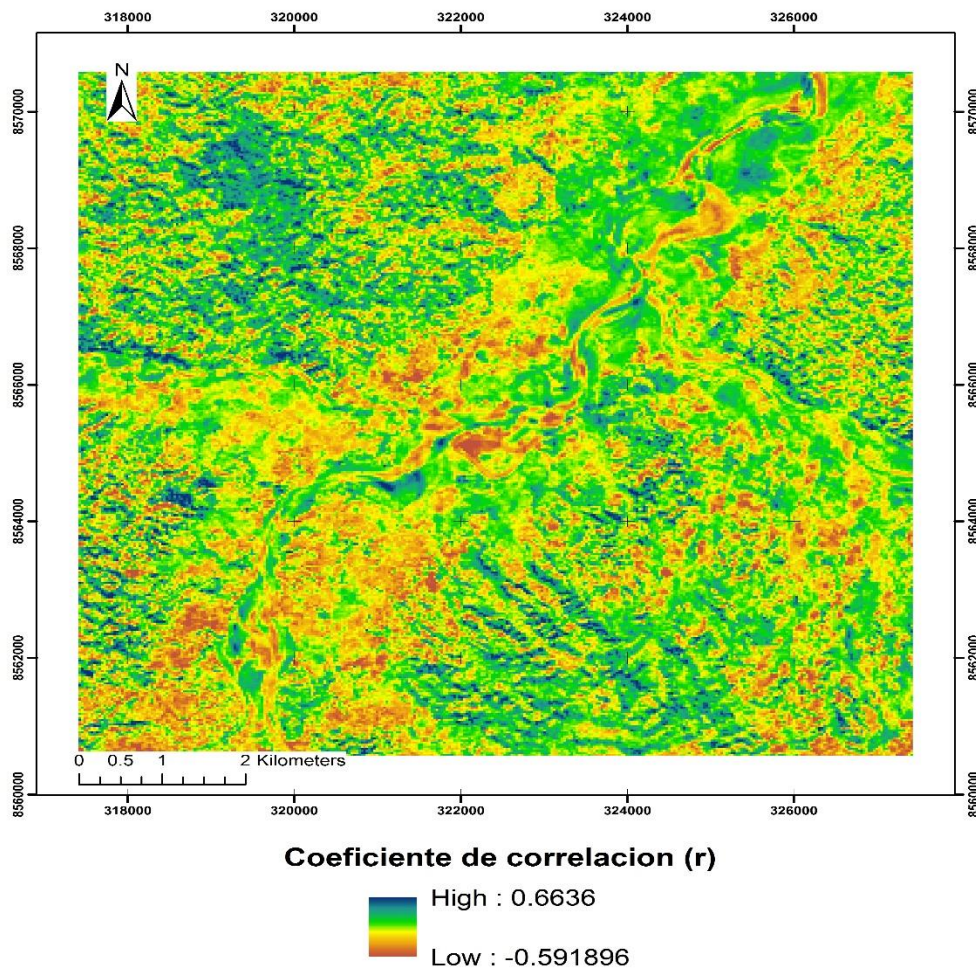
*Figura 52.* Valor promedio entre 1985-2017 del EVI (izquierda) y la precipitación (derecha), datos del sensor CHIRPS, para la zona de estudio Huetpetuhe.

La regresión lineal entre los valores de EVI y la Precipitación se ha calculado utilizando dos conjuntos de datos temporales. En los conjuntos temporales se han utilizado los datos de los meses de julio, agosto, septiembre y octubre, debido a que en esta temporada existe la mayor disponibilidad de imágenes satelitales con las mejores condiciones para la investigación, y se han dejado a un lado los de los meses de la estación lluviosa.

La mejor correlación entre el EVI y la precipitación se ha encontrado en los valores promedio de precipitación más altos para la zona de estudio, que llegan hasta el valor máximo de coeficiente de correlación ( $r$ ) 0,66, los datos analizados se asemeja a los estudios realizados por Puig 2015; Maita 2015, los cuales indican que la vegetación en relación con la precipitación no muestra prácticamente ningún grado de significación estadística o bien su coeficiente de correlación es muy bajo, lo cual indica que la vegetación aumenta independientemente de la cantidad de precipitación recibida.

Las áreas con mayor correlación son zonas que nunca fueron intervenidas y que en todo el periodo mantuvieron su cobertura vegetal, las áreas que fueron deforestadas por la actividad minera aurífera presentan los datos de correlación más bajos distribuidos espacialmente cerca de cuerpos de agua donde se

reportan valores que oscilan entre 0 y 0,2 de (r), lo que es estadísticamente insignificante.



*Figura 53.* Coeficiente de correlación (r) entre datos EVI y Precipitación para la zona de estudio Huetpetuhe.

### **Análisis de resultados en localizaciones concretas**

Siguiendo con el análisis de la investigación, se ha analizado la dinámica de la vegetación en comparación con el régimen de lluvias en localizaciones concretas en superficies mayores a 0,5 ha.

Estos resultados muestran que el comportamiento de la vegetación no es homogéneo, como se aprecia en la figura 54. Para la realización del análisis de perfil temporal entre ambas variables la zona fue elegida realizando un análisis pormenorizado a los datos históricos de EVI, ubicada en las coordenadas UTM

E325 226, N8 565 347, la zona presenta una tendencia positiva de vegetación mediante el test de tendencia Mann Kendall y el test de magnitud Theil Sen.

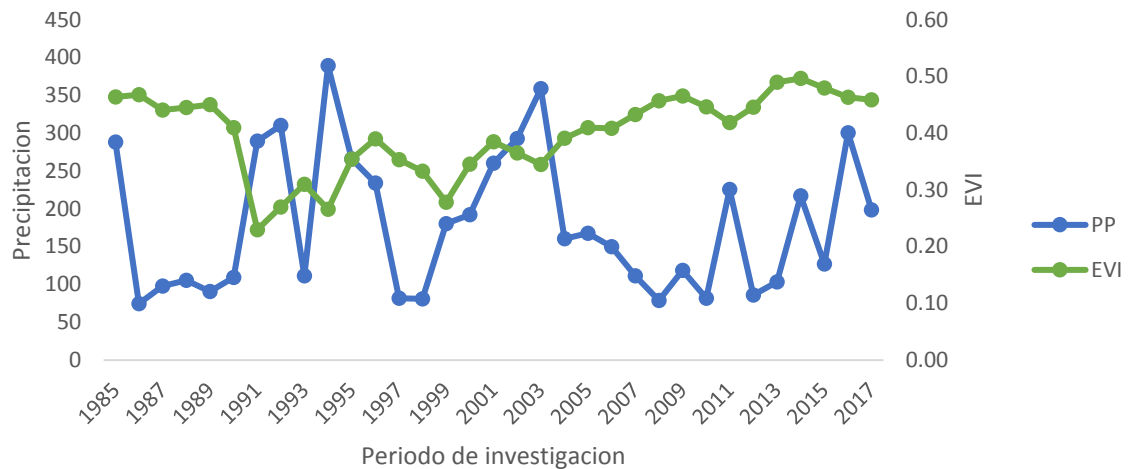
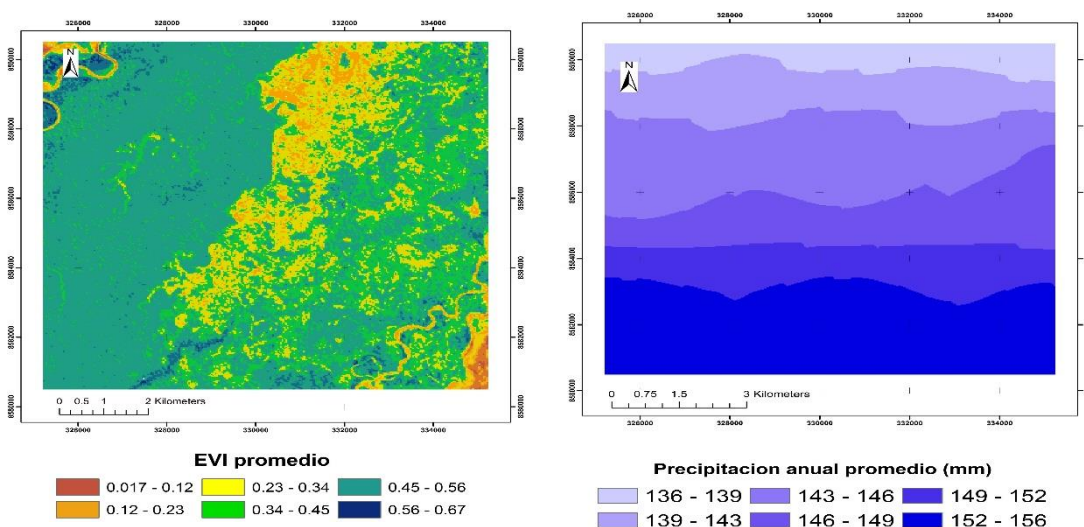


Figura 54. Perfil temporal entre el EVI y Precipitación.

#### 4.3.2 Relación espacial y temporal entre el EVI y la Precipitación en la zona de estudio Delta

Como primer paso se ha hecho una comparación visual entre el mapa del promedio del EVI y la precipitación promedio entre 1985 y 2017. Estos mapas no guardan una buena correspondencia geográfica respecto a sus valores máximo y mínimo (Figura 55). Los valores máximos del EVI se distribuyen a lo largo de la zona de estudio y los datos de precipitación se producen en la zona sur del área de estudio; los valores mínimos del EVI ocupan las zonas con menor cantidad de precipitación.



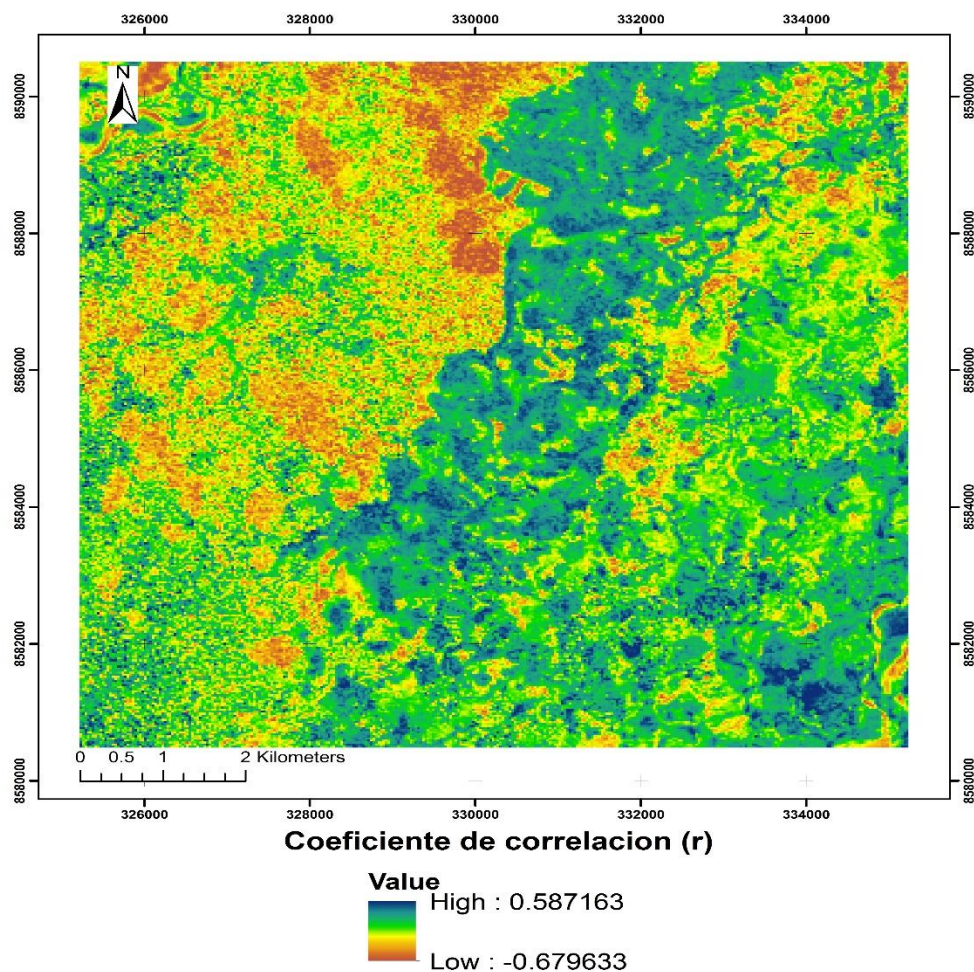
*Figura 55.* Valor promedio entre 1985-2017 del EVI (izquierda) y la precipitación (derecha), datos del sensor CHIRPS, para la zona de estudio Delta.

La regresión lineal entre los valores de EVI y la Precipitación se ha calculado utilizando dos conjuntos de datos temporales. En los conjuntos temporales se han utilizado los datos de los meses de julio, agosto, septiembre y octubre, debido a que en esta temporada existe la mayor disponibilidad de imágenes satelitales con las mejores condiciones para la investigación, y se han dejado a un lado los de los meses de la estación lluviosa.

La mayor correlación entre las variables se ha encontrado en los valores más altos de la precipitación promedio para la zona de estudio, que llegan hasta el valor máximo de coeficiente de correlación ( $r$ ) 0,58 los datos analizados se asemeja a los estudios realizados por Puig 2015; Maita 2015, los cuales indican que la vegetación en relación con la precipitación no muestra prácticamente ningún grado de significación estadística o bien su coeficiente de correlación es muy bajo, lo cual indica que la vegetación aumenta independientemente de la cantidad de precipitación recibida.

Las áreas con mayor correlación son zonas que empiezan a ser intervenidas por actividades mineras pero que aún mantienen áreas con cobertura vegetal, las áreas que fueron deforestadas por la actividad minera aurífera presentan los

datos de correlación más bajos distribuidos espacialmente cerca de cuerpos de agua donde se reportan valores que oscilan entre 0 y 0,2 de ( $r$ ), lo que es estadísticamente insignificante.



*Figura 56.* Coeficiente de correlación ( $r$ ) entre datos EVI y Precipitación para la zona de estudio Delta.

### **Análisis de resultados en localizaciones concretas**

Siguiendo con el análisis de la investigación, se ha analizado la dinámica de la vegetación en comparación con el régimen de lluvias en localizaciones concretas en superficies mayores a 0,5 ha. Estos resultados muestran que el comportamiento de la vegetación no es homogéneo, como se aprecia en la figura 57. Para la realización del análisis de perfil temporal entre ambas variables la zona fue elegida realizando un análisis pormenorizado a los datos históricos de



EVI, ubicada en las coordenadas UTM E328 141, N8 580 769, la zona presenta una tendencia positiva de vegetación mediante el test de tendencia Mann Kendall y el test de magnitud Theil Sen.

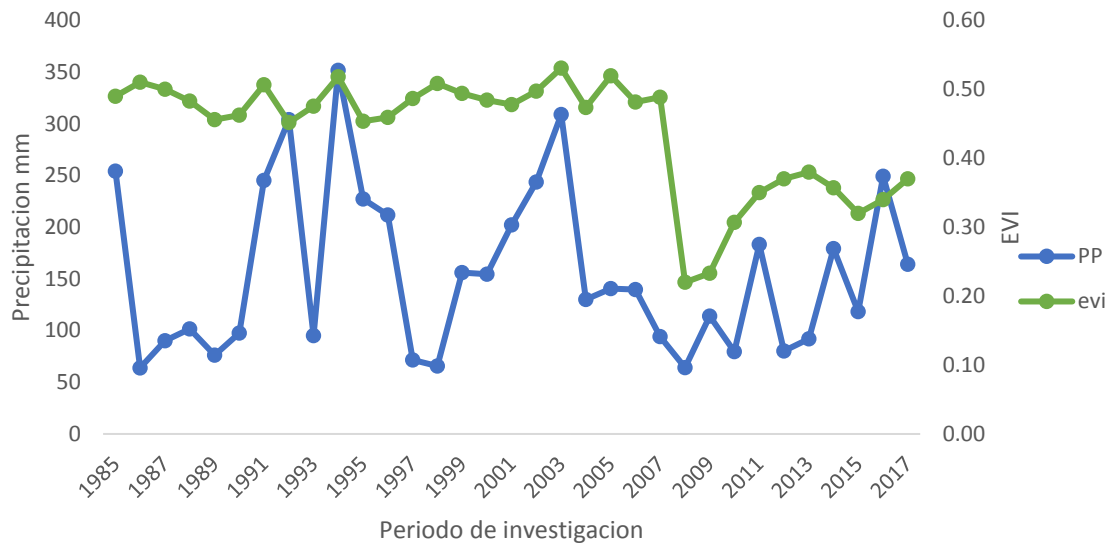
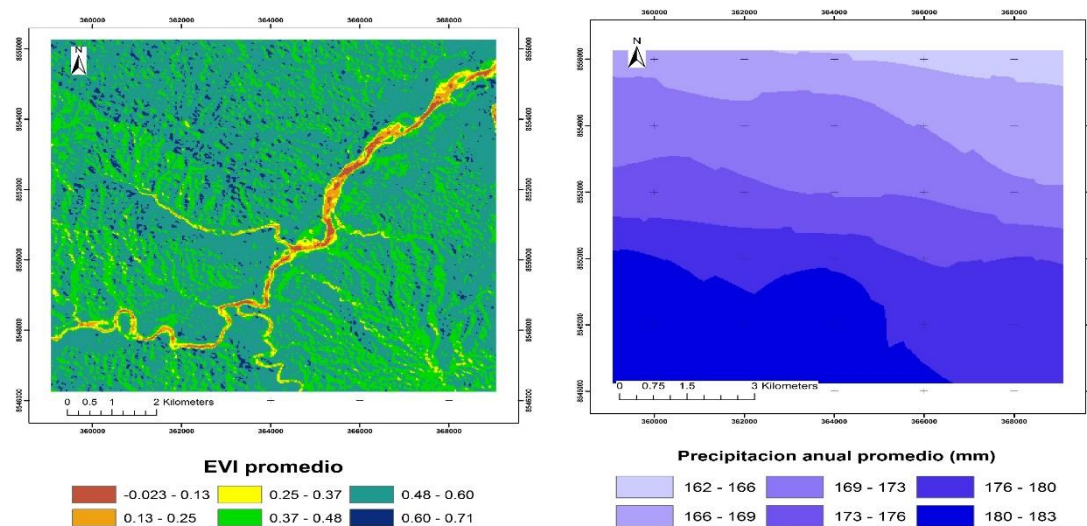


Figura 57. Perfil temporal entre el EVI y Precipitación.

#### 4.3.3 Relación espacial y temporal entre el EVI y la Precipitación en la zona de estudio Dos de Mayo

Como primer paso se ha hecho una comparación visual entre el mapa del promedio del EVI y la precipitación promedio entre 1985 y 2017. Estos mapas no guardan una buena correspondencia geográfica respecto a sus valores máximo y mínimo (Figura 58). Los valores máximos del EVI se distribuyen a lo largo de la zona de estudio y los datos de precipitación se producen en la zona sur del área de estudio.



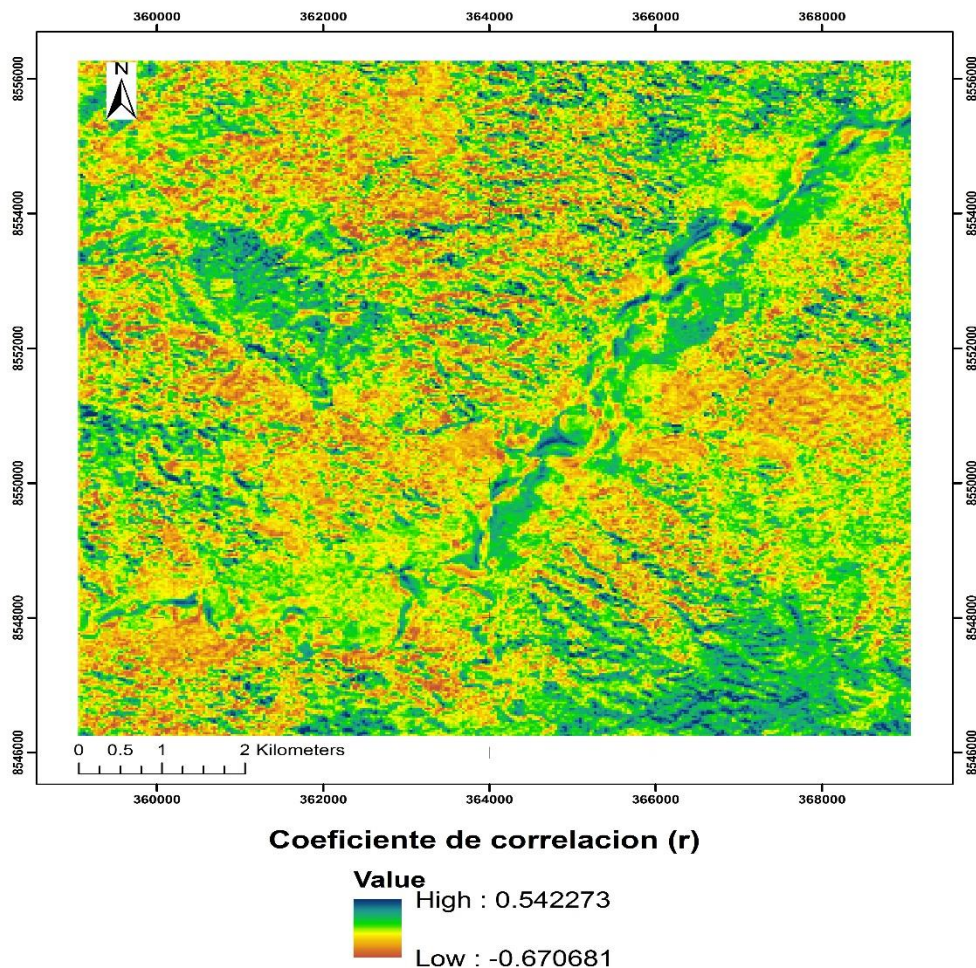
*Figura 58.* Valor promedio entre 1985-2017 del EVI (parte derecha) y la precipitación (parte izquierda), datos del sensor CHIRPS, para la zona de estudio Dos de Mayo.

La regresión lineal entre los valores de EVI y la Precipitación se ha calculado utilizando dos conjuntos de datos temporales. En los conjuntos temporales se han utilizado los datos de los meses de julio, agosto, septiembre y octubre, debido a que en esta temporada existe la mayor disponibilidad de imágenes satelitales con las mejores condiciones para la investigación, y se han dejado a un lado los de los meses de la estación lluviosa.

La mayor correlación entre el EVI y la precipitación se ha encontrado en los valores promedio de precipitación más altos para la zona de estudio, que llegan hasta el valor máximo de coeficiente de correlación ( $r$ ) 0,54 los datos analizados se asemeja a los estudios realizados por Puig 2015; Maita 2015, los cuales indican que la vegetación en relación con la precipitación no muestra prácticamente ningún grado de significación estadística o bien su coeficiente de correlación es muy bajo, lo cual indica que la vegetación aumenta independientemente de la cantidad de precipitación recibida.

Las áreas con mayor correlación son zonas que no sufren intervención por actividades mineras que aún mantienen áreas con cobertura vegetal, las áreas que fueron deforestadas por la actividad minera aurífera presentan los datos de correlación más bajos distribuidos espacialmente cerca de cuerpos de agua

donde se reportan valores que oscilan entre 0 y 0,2 de (r), lo que es estadísticamente insignificante.



*Figura 59.* Coeficiente de correlación (r) entre datos EVI y Precipitación para la zona de estudio Dos de Mayo.

### **Análisis de resultados en localizaciones concretas**

Siguiendo con el análisis de la investigación, se ha analizado la dinámica de la vegetación en comparación con el régimen de lluvias en localizaciones concretas en superficies mayores a 0,5 ha. Estos resultados muestran que el comportamiento de la vegetación no es homogéneo, como se aprecia en la figura 60. Para la realización del análisis de perfil temporal entre ambas variables la zona fue elegida realizando un análisis pormenorizado a los datos históricos de

EVI, ubicada en las coordenadas UTM E364 996, N8 549 892, la zona presenta una tendencia negativa de vegetación mediante el test de tendencia Mann Kendall y el test de magnitud Theil Sen.

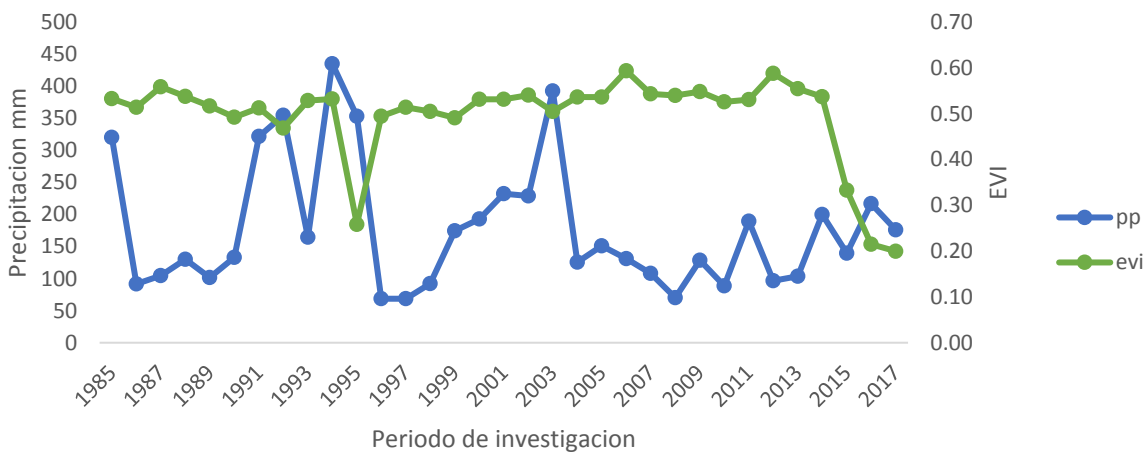
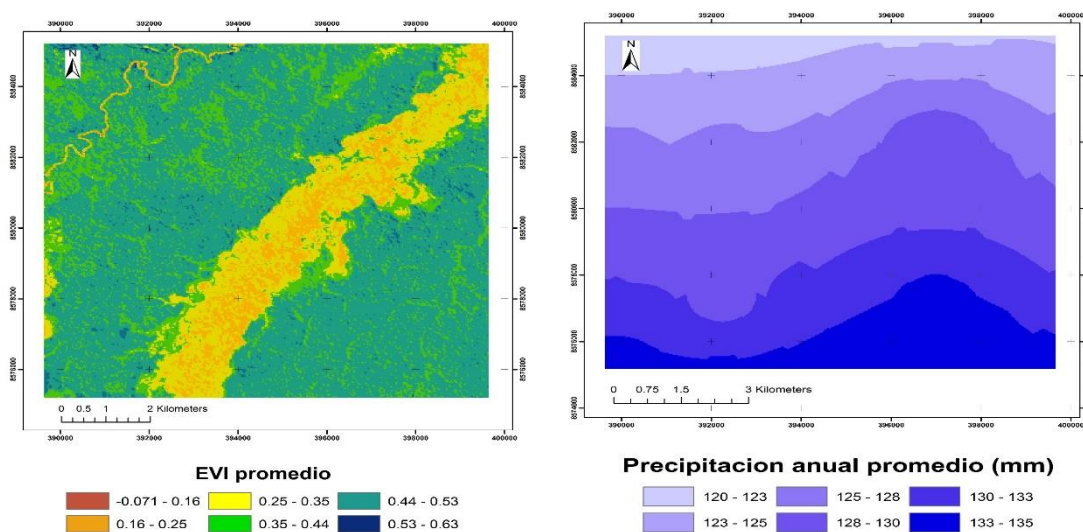


Figura 60. Perfil temporal entre el EVI y Precipitación.

#### 4.3.4 Relación espacial y temporal entre el EVI y la Precipitación en la zona de estudio La Pampa.

Como primer paso se ha hecho una comparación visual entre el mapa del promedio del EVI y la precipitación promedio entre 1985 y 2017. Estos mapas no guardan una buena correspondencia geográfica respecto a sus valores máximo y mínimo (Figura 61). Los valores máximos del EVI se encuentran a los márgenes izquierda y derecha de la franja de deforestación en la zona de estudio y los datos de precipitación se producen en la zona suroeste y sureste del área de estudio; los valores mínimos del EVI ocupan una franja bien delimitada trazando un diagonal de sur a norte.



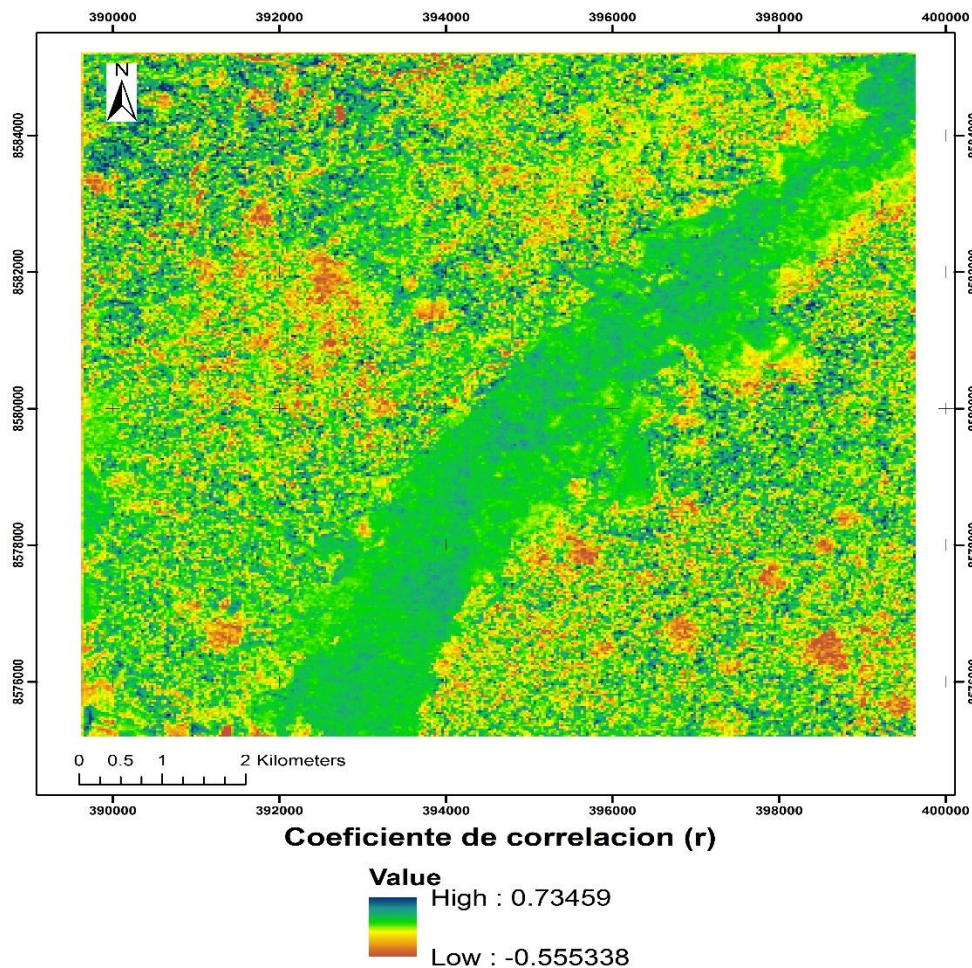
*Figura 61.* Valor promedio entre 1985-2017 del EVI (parte derecha) y la precipitación (parte izquierda), datos del sensor CHIRPS, para la zona de estudio La Pampa.

La regresión lineal entre los valores de EVI y la Precipitación se ha calculado utilizando dos conjuntos de datos temporales. En los conjuntos temporales se han utilizado los datos de los meses de julio, agosto, septiembre y octubre, debido a que en esta temporada existe la mayor disponibilidad de imágenes satelitales con las mejores condiciones para la investigación, y se han dejado a un lado los de los meses de la estación lluviosa.

La mayor correlación entre él EVI y la precipitación se ha encontrado en los valores promedio de precipitación más altos para la zona de estudio, que llegan hasta el valor máximo de coeficiente de correlación ( $r$ ) 0,73 los datos analizados se asemeja a los estudios realizados por Puig 2015; Maita 2015, los cuales indican que la vegetación en relación con la precipitación no muestra prácticamente ningún grado de significación estadística o bien su coeficiente de correlación es muy bajo, lo cual indica que la vegetación aumenta independientemente de la cantidad de precipitación recibida.

Las áreas con mayor correlación son zonas que no han sufrido ninguna intervención por actividades mineras y aún mantienen áreas con cobertura vegetal, las áreas que fueron deforestadas por la actividad minera aurífera presentan los datos de correlación más bajos distribuidos espacialmente cerca

de cuerpos de agua donde se reportan valores que oscilan entre 0,3 y 0,4 de (r), lo que es estadísticamente insignificante.



*Figura 62.* Coeficiente de correlación (r) entre datos EVI y Precipitación para la zona de estudio La Pampa.

### **Análisis de resultados en localizaciones concretas**

Siguiendo con el análisis de la investigación, se ha analizado la dinámica de la vegetación en comparación con el régimen de lluvias en localizaciones concretas en superficies mayores a 0,5 ha. Estos resultados muestran que el comportamiento de la vegetación no es homogéneo, como se aprecia en la figura 63. Para la realización del análisis de perfil temporal entre ambas variables la zona fue elegida realizando un análisis pormenorizado a los datos históricos de EVI, ubicada en las coordenadas UTM E397 881 N8 582 478, la zona presenta

una tendencia positiva de vegetación mediante el test de tendencia Mann Kendall y el test de magnitud Theil Sen.

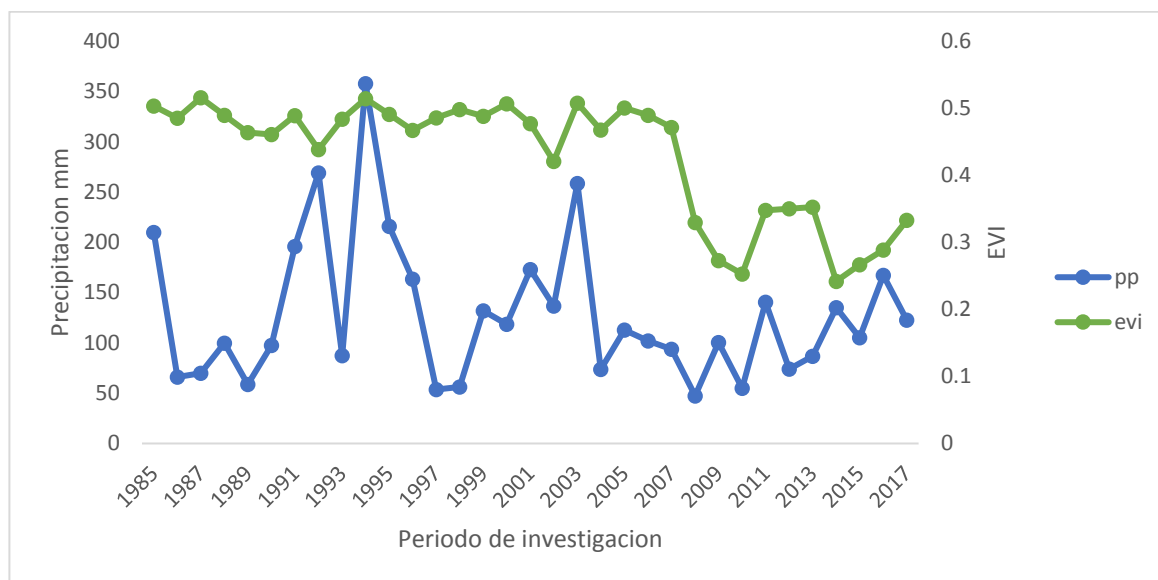


Figura 63. Perfil temporal entre el EVI y Precipitación.

#### 4.4 Perfil vertical de los estadios sucesionales de la vegetación en las zonas de estudio.

Para el análisis de estadios sucesionales se tomará en cuenta la estratificación vertical (brinzal, latizal y fustal) actual del estado de la vegetación y determinar el estadio en que se encuentre (ver tabla 13); para generar los perfiles verticales de las diferentes tipos de cobertura se tomara en trazo de 50 m lineales y tener datos más concretos del tipo de cobertura que predomine en dicho trazo, los transectos se tomara de sur a norte teniendo como punto medio la dispersión de puntos de validación.

Tabla 13. Descripción de estratificación vertical de los estadios sucesionales

Estadio sucesional	Descripción
Brinzal	se refiere a la masa comprendida entre 0,3 m y 1,3 m de altura
Latizal	se refiere a la masa comprendida entre 1,3 m de altura 9,9 cm de diámetro.

Fustal	Es la vegetación vigorosa con diámetros superiores a 10 cm y 5 m de altura.
--------	-----------------------------------------------------------------------------

Fuente: Tomado y adaptado de FAO (2010) y Camelo (2015).

#### 4.4.1 Estadios sucesionales de la vegetación para la zona de estudio Huepetuhe.

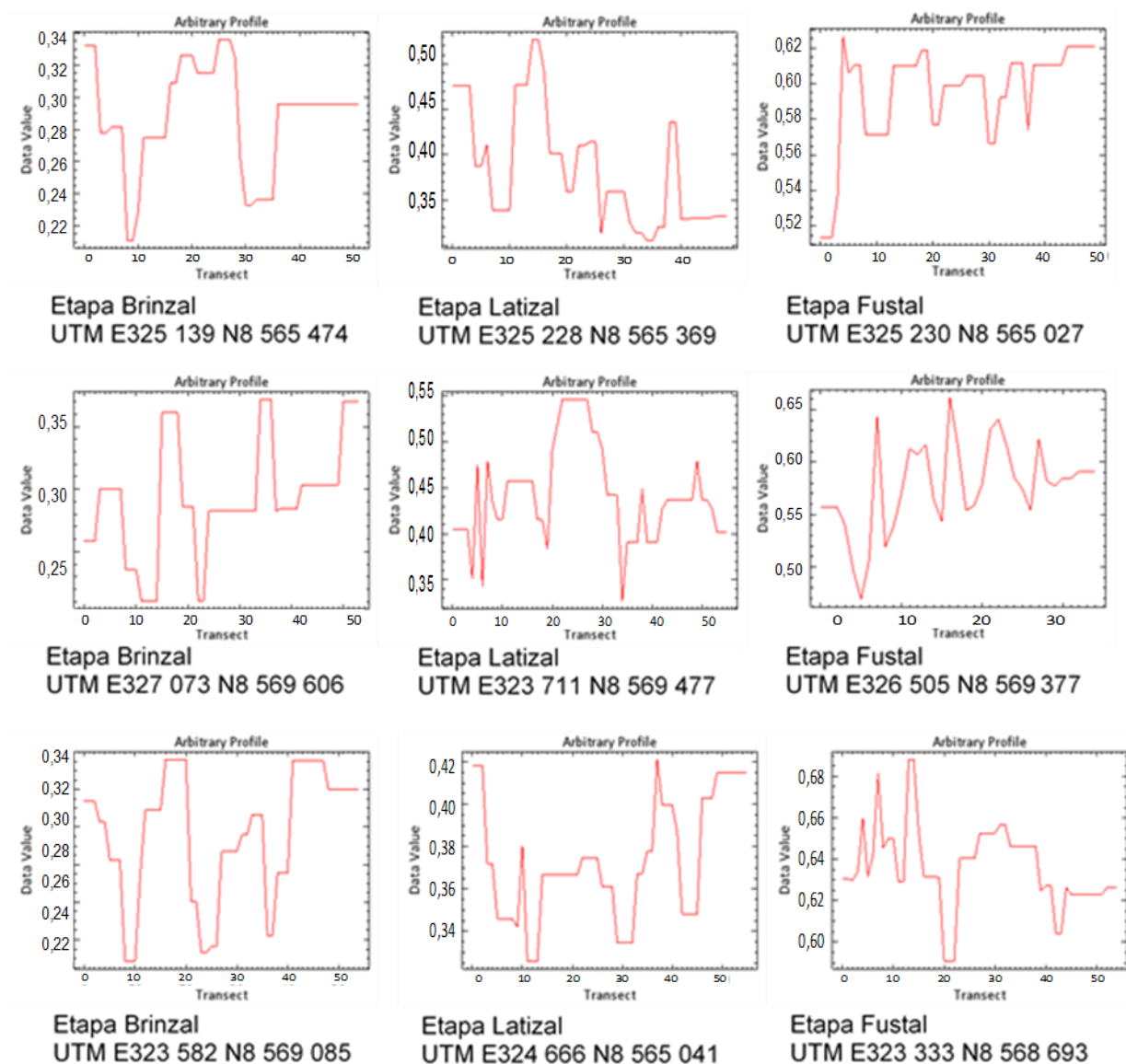


Figura 64. Etapas sucesionales de la vegetación en función al EVI en la zona de estudio Huepetuhe.



Los estadios sucesionales para la zona de estudio de Huepetuhe están claramente diferenciados entre una etapa y la otra como se observa en la figura 64, la etapa sucesional de los brinzales fluctúa en el rango 0,2 y 0,35; donde predominan las especies pioneras herbáceas y arbustivas, la etapa de los latizales poseen un rango entre 0,35 y 0,50; donde abundan heliófilas efímeras las cuales tienen características de un rápido crecimiento formando un dosel cerrado y eliminando a las especies brinzales, para luego dar paso a los fustales o especies duraderas que tienen un rango superior a 0,50.

#### 4.4.2 Estadios sucesionales de la vegetación para la zona de estudio Delta.

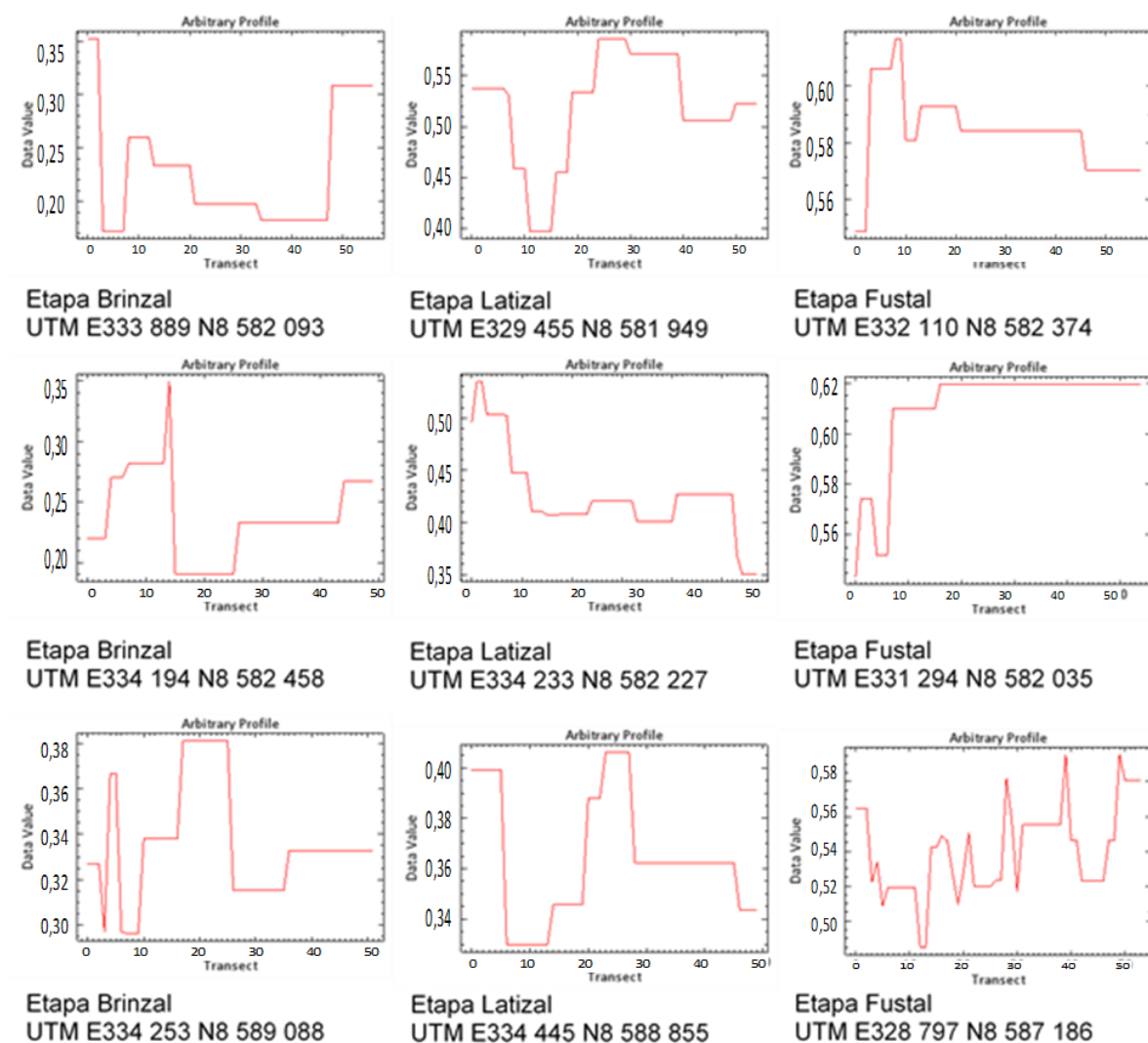
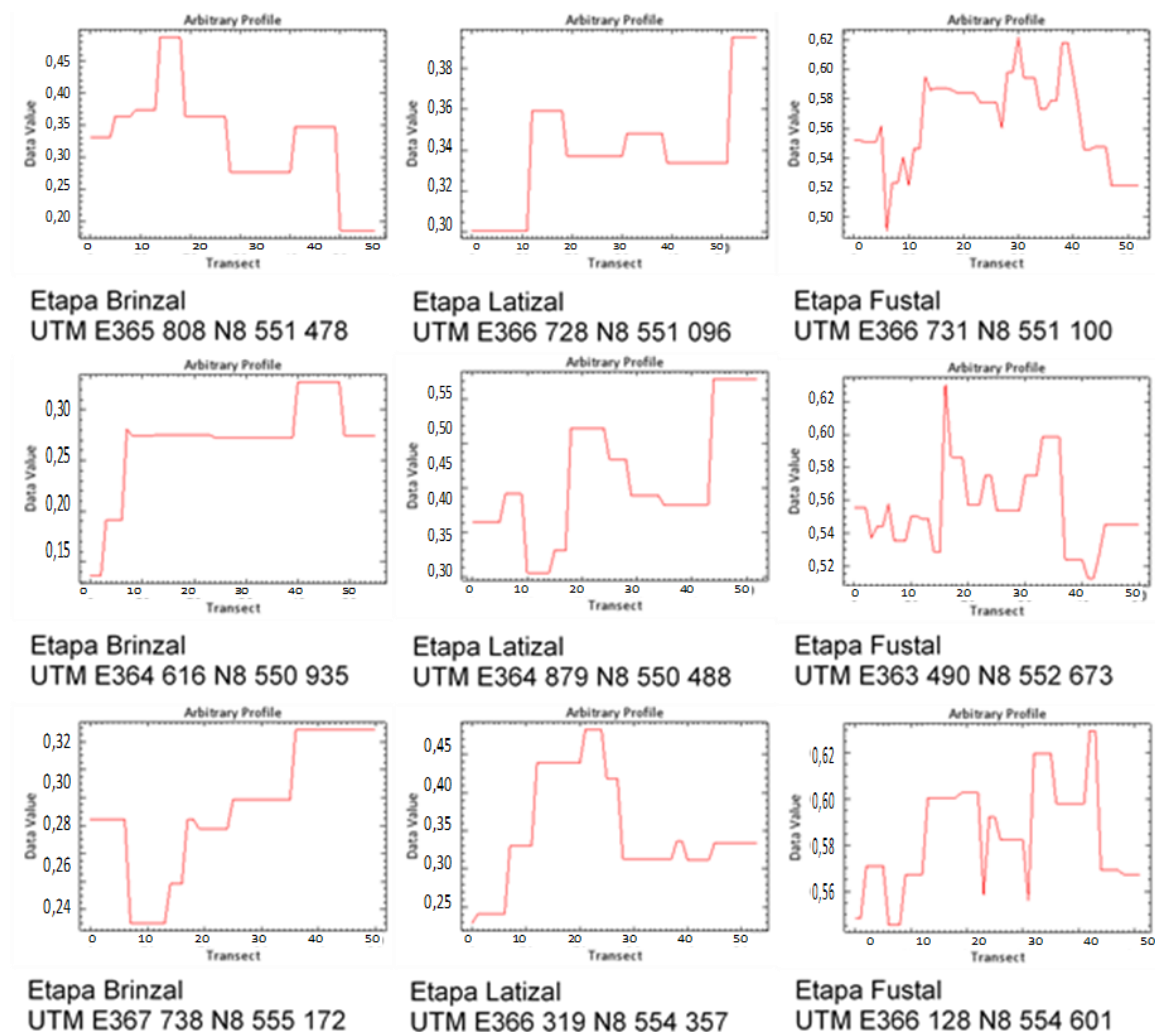


Figura 65. Etapas sucesionales de la vegetación en función al EVI en la zona de estudio Delta.

Los estadios sucesionales para la zona de estudio Delta están claramente diferenciados entre una etapa y la otra como se observa en la figura 65, la etapa sucesional de los brinzales fluctúa en el rango 0,2 y 0,35; donde predominan las especies pioneras herbáceas y arbustivas, la etapa de los latizales poseen un rango entre 0,35 y 0,50; donde abundan heliófilas efímeras las cuales tienen características de un rápido crecimiento formando un dosel cerrado y eliminando a las especies brinzales, para luego dar paso a los fustales o especies duraderas que tienen un rango superior a 0,50.

#### 4.4.3 Estadios sucesionales de la vegetación para la zona de estudio Dos de Mayo.



*Figura 66.* Etapas sucesionales de la vegetación en función al EVI en la zona de estudio Dos de Mayo.

Los estadios sucesionales para la zona de estudio Dos de Mayo están claramente diferenciados entre una etapa y la otra como se observa en la figura 66, la etapa sucesional de los brinzales fluctúa en el rango 0,2 y 0,35; donde predominan las especies pioneras herbáceas y arbustivas, la etapa de los latizales poseen un rango entre 0,35 y 0,50; donde abundan heliófilas efímeras las cuales tienen características de un rápido crecimiento formando un dosel cerrado y eliminando a las especies brinzales, para luego dar paso a los fustales o especies duraderas que tienen un rango superior a 0,50.

#### **4.4.4 Estadios sucesionales de la vegetación para la zona de estudio La Pampa.**

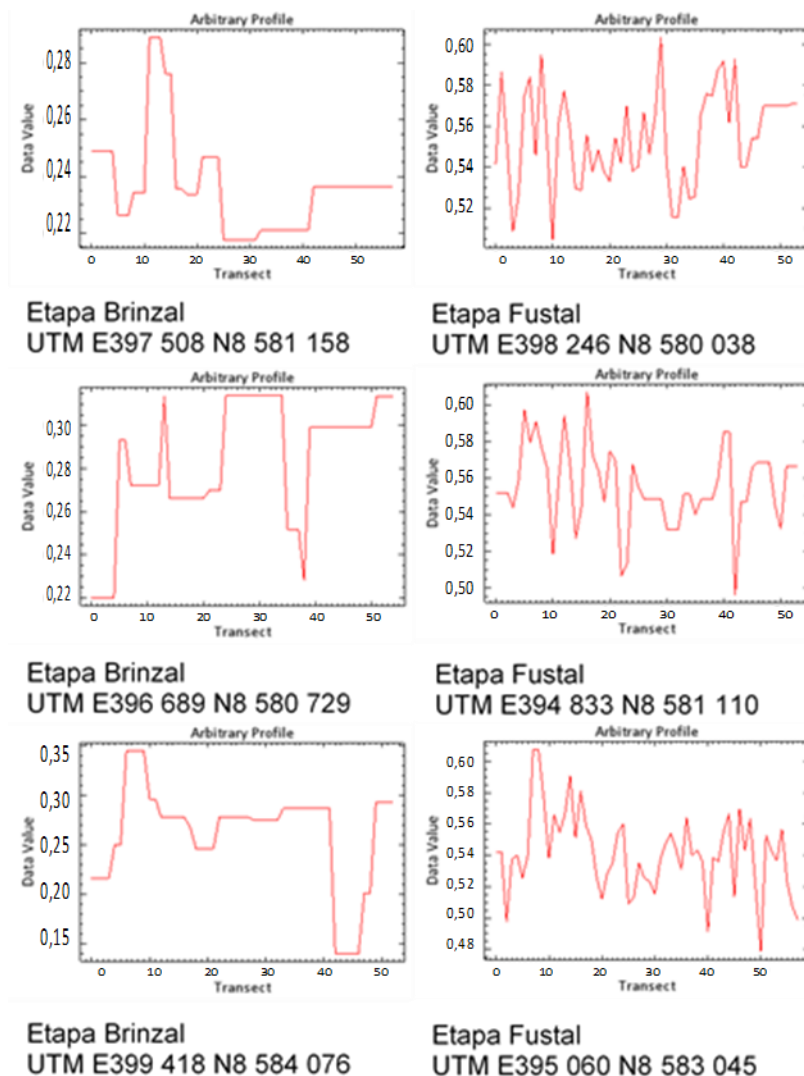


Figura 67. Etapas sucesionales de la vegetación en función al EVI en la zona de estudio La Pampa.

Los estadios sucesionales para la zona de estudio La Pampa no están claramente diferenciados y definidos entre una etapa y la otra como se observa en la figura 66, la etapa sucesional de los brinzales fluctúa en el rango 0,2 y 0,3; donde predominan las especies pioneras herbáceas y arbustivas, no se encontraron áreas que presenten la característica para etapa latizales, debido al tipo de minería que se realiza en dicha zona la cual causa que la regeneración sea más prolongada y demore en desarrollarse entre etapas; la etapa de los

fustales en la zona de estudio La Pampa fueron áreas que nunca sufrieron intervención por actividad minera, se tomó áreas de referencia para conocer el rango en que fluctúa la vegetación sin intervención que tiene un rango superior a 0,5.

#### 4.4.5 Valores de EVI para diferentes tipos de cobertura

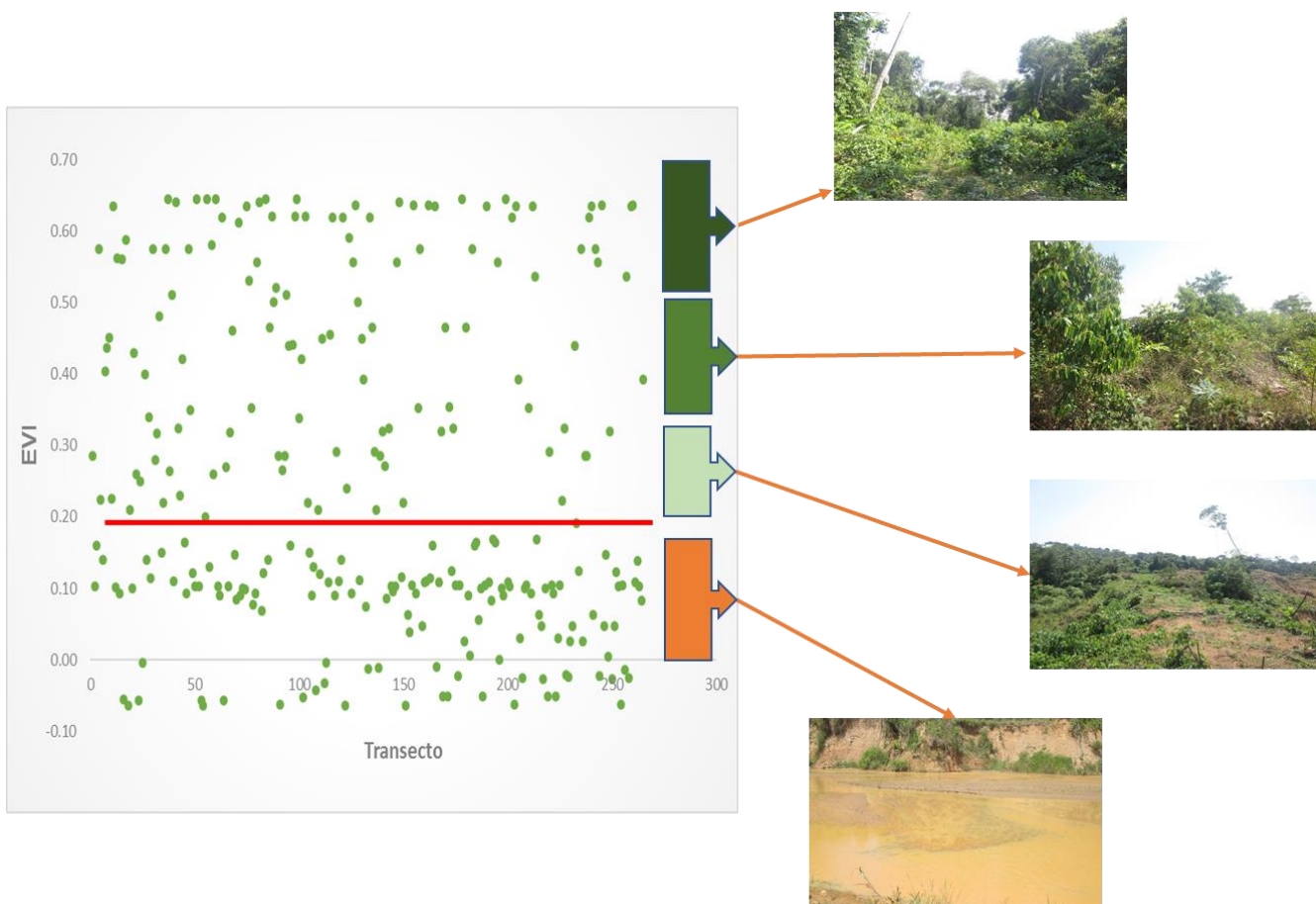


Figura 68. Clasificación de superficies a partir de la dispersión de los valores del EVI.

Para determinar el tipo de superficie se realizó un transecto lineal de 250 m que comprenda los diferentes tipos de cobertura (agua, minería, cobertura vegetal), donde los cuerpos de agua sin sedimentos presentan valores inferiores a 0, la minería y los cuerpos de agua con sedimentos tienen un comportamiento similar en los valores del EVI que van desde 0 a 0,2 aproximadamente y las superficies

con vegetación tienen un comportamiento en el EVI superiores a 0,2, los resultados obtenidos por (Rojas Flores 2017), indican que los valores del NDVI para la vegetación tienen un umbral mayor o igual 0,60 como se observa en la figura 11, lo cual no permite analizar los estadios sucesionales a mayor detalle.

El EVI corrige las distorsiones en la luz reflejada causadas por la nubosidad y los aerosoles en la atmósfera que bloquean la visión de los satélites. Este índice no se satura fácilmente como el NDVI cuando se observa selva tropical y otras áreas de la Tierra con grandes cantidades de clorofila (Huete et al. 2002; Ferreira et al. 2004; Roberts, Keller y Soares 2003; Xiao et al. 2005)..

## 4.5 Evaluación de precisión

### 4.5.1 Matriz de confusión

Tabla 14. *Matriz de confusión*

Observador 1	Observador 2					Marginal
	BOSQUE	LATIZAL	BRINZAL	MINERIA	AGUA	
BOSQUE	<b>155</b>	0	2	0	0	157
LATIZAL	0	<b>44</b>	0	0	1	45
BRINZAL	0	3	<b>44</b>	2	3	52
MINERIA	0	0	5	<b>59</b>	4	68
AGUA	0	0	7	1	<b>38</b>	46
Marginal	155	47	58	62	46	368

Tabla 15. *Precisión de resultados para la investigación.*

ÍNDICE KAPPA	ERROR ESTÁNDAR	I.C 95%	FUERZA DE CONCORDANCIA
0,896573184	0,01878753	(0,8597 – 0,9333)	Casi perfecta

En la tabla 13 se observa la matriz de confusión de los resultados obtenidos de la investigación, donde los valores de la diagonal (155, 44, 44, 59, 38) expresa los puntos de validación que coinciden con los tipos de cobertura tanto el observador y el observado, los puntos que no se discriminan bien entre los diferentes tipos de cobertura se lo considero el que tenía mayor superficie dentro del pixel.

En la tabla 14 se observa el resultado de la matriz de confusión, teniendo como resultado un índice de Kappa del 89,65% de exactitud, lo cual indica que el resultado de la investigación es casi perfecto.

## CONCLUSIONES

El análisis espacial de la precipitación en las cuatro zonas de estudio, determino que la zona que presenta menor precipitación fue La Pampa con 48 mm para el año 2008, inicios del declive de la pérdida de vegetación por actividades minera aurífera, la precipitación promedio máximo para los meses de estudio se obtuvo en la zona de estudio Dos de Mayo con un valor de 425,94 mm para el año 1994, las zonas con mayor precipitación promedio son Huepetuhe y Dos de Mayo con 179, 86 y 179,81 respectivamente siendo estas las zonas de selva alta donde la precipitación es frecuente, cabe mencionar que los datos de precipitación promedio anual son obtenidos de 4 meses (JASO) de acuerdo a la fecha de adquisición, la precipitación en el periodo de investigación para las cuatro zonas de estudio no es homogénea ya que poseen años en que se tiene meses con precipitaciones más prolongadas y otros años con precipitaciones momentáneas.

Los datos del sensor CHIRPS brindan valores de precipitación óptimos para las zonas de estudio similares a los ya reportados por instituciones del estado (SENHAMI, MINAM), por lo tanto, pueden ser utilizados para estudiar la dinámica de la precipitación para la región de Madre de Dios.

Se determinó el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) para las cuatro zonas de estudio a partir de escenas satelitales de los sensores Landsat 5, 7 y 8, donde la zona que tiene más superficie impactada es Delta y la zona menos impactada es Dos de Mayo, cabe destacar que en la zona en mención viene realizando actividades mineras con frecuencia a partir del año 2014, la zona con mayor tendencia de regeneración es la zona de Huepetuhe de acuerdo a los datos obtenidos del test de tendencia Mann-Kendall y test de magnitud Theil-Sen.

La Pampa es la zona que presenta menor tendencia a regeneración con un 9,8% de su superficie según los datos obtenidos por los test de Mann-Kendall y Theil-Sen, las zonas Dos de Mayo y Delta presentan mayor superficie con tendencia a regeneración con un porcentaje de 50,8% y 53,8% respectivamente, la zona de estudio Huepetuhe tiene una tendencia de 34,8% de su superficie a regenerarse.



A partir del EVI se determinó los rangos en que oscilan las diferentes clases (agua, minería, cobertura vegetal), donde los cuerpos de agua sin sedimentos poseen valores inferiores o iguales a 0, las zonas con actividades mineras (deforestación, cuerpos de agua con sedimentos) poseen valores que van 0 hasta 0,20 y valores superiores a 0,20 son superficies con cobertura vegetal o bosques densos que nunca fueron intervenidas.

Se ha determinado la relación existente entre la precipitación y la vegetación, a través del EVI, buscando patrones temporales y espaciales del EVI explicables a partir de la variación de la precipitación entre 1985 y 2017.

Los datos de precipitación proceden exclusivamente del sensor CHIRPS que han sido interpolados y adecuados a la resolución espacial de las imágenes de satélite Landsat, para poder establecer una relación espacial entre ambas variables; el análisis lineal entre el EVI y la precipitación se esperaba que tengan comportamientos similares entre sí, pero esto no sucede en las cuatro zonas de estudio. La precipitación es una variable climática difícil de representar espacialmente.

Los valores del EVI tienen una resolución espacial de 30 m, en una superficie de 30 x 30m existe diferentes tipos de cobertura, que probablemente han ido cambiando a lo largo del tiempo por actividades mineras auríferas y la variabilidad climática.

Los mejores resultados de la regresión lineal entre las variables precipitación y EVI entre 1985 y 2017 se producen en zonas con vegetación densa y que nunca fueron intervenidas llegando hasta valores de correlación promedio ( $r=0,5$ ), las zonas más próximas a cuerpos de agua donde existe gran cantidad de actividad minera son superficies con una correlación muy baja y que no son estadísticamente significativas, lo cual indica que la vegetación en zonas impactadas por minería aurífera aumenta independientemente de la cantidad de precipitación recibida.

Por otro lado, la precipitación no es la única variable necesaria en el desarrollo de la vegetación, puesto que influyen otros factores ambientales locales, como temperatura, relieve, tipo de suelo, vientos, humedad y las condiciones adaptativas que tiene la vegetación.

Se caracterizó la dinámica de la vegetación en las cuatro zonas de estudio mediante el análisis de series temporales a través del EVI, la dinámica de la vegetación tiene periodos demarcados por el Índice de Vegetación Mejorado (EVI), en la cual se observa que las superficies que presentan incremento de cobertura vegetal (regeneración natural) poseen un EVI mayor o igual a 0,2 como se observa en la figura 68.

Se rechaza la hipótesis nula con respecto a la variabilidad temporal de la vegetación en zonas deforestadas por minería aurífera en las cuatro zonas de estudio, lo cual indica que si se puede evaluar o monitorear la dinámica de la vegetación mediante el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) obtenido de imágenes satelitales Landsat.

## **SUGERENCIAS**

A futuras investigaciones, realizar estudios de composición florística en las áreas reportadas con tendencia positiva a regenerarse y dar un seguimiento continuo.

Se recomienda replicar este tipo de estudio para diferentes actividades que afecten directamente a la cobertura vegetal y realizar un análisis más pormenorizado para determinar el periodo que tardan en regenerarse de manera natural.

Probar nuevas variables climáticas para observar el comportamiento de la vegetación frente a ellas, es necesario trabajar con imágenes de todo el año, aunque en los meses diciembre – mayo, es difícil de obtener imágenes satelitales sin nubosidad.

La Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios realizar convenios con instituciones estados, ONG, empresas privadas que trabajen con imágenes de mejor resolución espacial para facilitar a las investigaciones futuras en el campo de la percepción remota y sistemas de información geográfica y obtener resultados más exactos, asimismo se recomienda la adquisición de licencias de software para el monitoreo de la vegetación (TerrSet, ENVI, ArcGIS, entre otros) ya que éstas facilitan la publicación en revistas científicas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALARCON, G.A., VARGAS, R.F., CORREA NÚÑEZ, G. y ULLOA GALLARDO, N.J., 2010. Detección de cambios de cobertura boscosa a través del análisis multitemporal de imágenes satelitales en el distrito de Inambari. Change detection of forest cover through multitemporal analysis of satellite imagery in the district of Inambari. ,
- ALATORRE, L.C., BEGUERIA, S. y VICENTE SERRANO, S.M., 2010. Análisis de la evolución espacio-temporal del ndvi sobre áreas vegetadas y zonas de riesgo de erosión en el pirineo central. , vol. 165, pp. 7-27. DOI 10.3989/Pirineos.2010.165001.
- ALCARAZ SEGURA, D., BALDI, G., DURANTE, P. y GARBULSKY, M.F., 2008. Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas : tres casos de estudio a distintas escalas espaciales , temporales y de gestión . , vol. 17, no. 3, pp. 108-117.
- ASNER, G.P., LLACTAYO, W., TUPAYACHI, R. y LUNA, E.R., 2013. Elevated rates of gold mining in the Amazon revealed through high-resolution monitoring. Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 110, no. 46, pp. 18454-18459. ISSN 0027-8424. DOI 10.1073/pnas.1318271110.
- AVERY, T.E., BERLIN, G.L. y AVERY, T.E., 1992. Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation. S.I.: Macmillan. ISBN 0023050357.
- BACA TUPAYACHI, E., 2013. Estudio sobre marco normativo minero en Perú. . S.I.:
- BANNARI, A., MORIN, D., BONN, F. y HUETE, A.R., 1995. A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews, vol. 13, no. 1-2, pp. 95-120. ISSN 0275-7257. DOI 10.1080/02757259509532298.
- BARET, F. y GUYOT, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environment, vol. 35, no. 2-3,

pp. 161-173. ISSN 0034-4257. DOI 10.1016/0034-4257(91)90009-U.

BCRP, B.C.D.R.D.P., 2011. Caracterización del departamento de Madre De Dios.  
. Cusco:

BELSPO, 1999. Belgian Science Policy Office (BELSPO) / Space Engineering  
& Technology / Our Activities / ESA. [en línea]. [Consulta: 9 mayo 2018].  
Disponible en:  
[https://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Engineering\\_Technology/Belgian\\_Science\\_Policy\\_Office\\_BELSPO](https://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Belgian_Science_Policy_Office_BELSPO).

BRAVO, E.H., ORDOÑEZ, Y. y VELOZO, C., 2015. Bosques secundarios; Manejarlos, preservarlos o eliminarlos? CATIE, DOI 1659-3480.

CABELLO, J. y PARUELO, J.M., 2008. La teledetección en estudios ecológicos. Ecosistemas, vol. 17, no. 3, pp. 1-3.

CAMELO SALAMANCA, D., 2015. Evaluación del estado sucesional actual de las áreas restauradas y con invasión previa de *Ulex europaeus* L. en los Cerros Orientales de Bogotá. S.l.: Facultad de Ciencias.

CHUVIECO, E., 2010. Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio. S.l.: Ariel. ISBN 8434434989.

CHUVIECO SALINERO, E., 1996. Empleo de imágenes de satélite para medir la estructura del paisaje: Análisis cuantitativo y representación cartográfica. serie geográfica, vol. 6, pp. 131-147.

CHUVIECO SALINERO, E., 2008. Teledetección ambiental la observación de la tierra desde el espacio. S.l.: Ariel. ISBN 9788434480733.

CLARK, D., 1987. Análisis de la regeneración de árboles del dosel en bosque muy húmedo tropical; aspectos teóricos y prácticos. sidalc.net,

CLEMENTS, F., 1916. Plant succession: an analysis of the development of vegetation. ,

- CURRAN, P.J., 1981. Multispectral remote sensing of vegetation amount. *Progress in Physical Geography*, vol. 4, no. 3, pp. 315-341. ISSN 0309-1333. DOI 10.1177/030913338000400301.
- DE LA MORA COVARRUBIAS, A. y REYES VILLEGAS, N., 2011. Manual de prácticas de teledetección y sistemas de información geográfica. 2011. Ciudad de Juarez: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- DIRECCION GENERAL DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL, 2015. Cuantificación y análisis de la deforestación en la Amazonia peruana en el periodo 2010-2011-2013-2014. . Lima:
- DIRECCION GENERAL DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL, 2016. Resultados del análisis de deforestación en la Amazonía Peruana para el periodo 2014-2015. . S.l.:
- ENVI, 2013a. Calibrating Images Tutorial In. , pp. 1-14.
- ENVI, 2013b. ENVI Classic Tutorial: Atmospherically Correcting Multispectral Data Using FLAASH®. 2013. S.l.: s.n.
- ESRI, 2016. ArcMap | ArcGIS Desktop. [en línea]. [Consulta: 4 septiembre 2018]. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/desktop/>.
- EVRENDILEK, F. y GULBEYAZ, O., 2008. Deriving Vegetation Dynamics of Natural Terrestrial Ecosystems from MODIS NDVI/EVI Data over Turkey. *Sensors*, vol. 8, no. 9, pp. 5270-5302. ISSN 1424-8220. DOI 10.3390/s8095270.
- FAO, 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010 Informe principal. . S.l.:
- FERNÁNDEZ COPPEL, I.A. y HERRERO LLORENTE, E., 2001. Análisis Visual de Imágenes Obtenidas del Sensor ETM+ -Satélite Landsat. . VALLADOLID:
- FERREIRA, L.G., YOSHIOKA, H., HUETE, A. y SANO, E.E., 2004. Optical characterization of the Brazilian Savanna physiognomies for improved land

cover monitoring of the cerrado biome: preliminary assessments from an airborne campaign over an LBA core site. *Journal of Arid Environments*, vol. 56, no. 3, pp. 425-447. ISSN 0140-1963. DOI 10.1016/S0140-1963(03)00068-5.

FUNK, C.C., PETERSON, P.J., LANDSFELD, M.F., PEDREROS, D.H., VERDIN, J.P., ROWLAND, J.D., ROMERO, B.E., HUSAK, G.J., MICHAELSEN, J.C. y VERDIN, A.P., 2014. A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. *Data Series*. S.I.:

GILL, T.K., PHINN, S.R., ARMSTON, J.D. y PAILTHORPE, B.A., 2009. Estimating tree-cover change in Australia: challenges of using the MODIS vegetation index product. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 30, no. 6, pp. 1547-1565. ISSN 0143-1161. DOI 10.1080/01431160802509066.

GLENN, E., HUETE, A., NAGLER, P. y NELSON, S., 2008. Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape. *Sensors*, vol. 8, no. 4, pp. 2136-2160. ISSN 1424-8220. DOI 10.3390/s8042136.

GONZAGA AGUILAR, C., 2014. Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la provincia de Loja, Ecuador. S.I.: Universidad Nacional de La Plata.

GOULDING, M., BARTHEM, R., CAÑAS, C., HIDALGO, M. y ORTEGA, H., 2010. La Cuenca del río Inambari: ambientes acuáticos, biodiversidad y represas. S.I.: s.n. ISBN 9786124548314.

GUERRERO, M.B., 2011. Desarrollo de un modulo SIG para el manejo de imágenes multiespectrales orientado a la agricultura de precision. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.

HELSEL, D.R. y FRANS, L.M., 2006. Regional Kendall Test for Trend. *Environ.*

Sci. Technol. Lett., DOI 10.1021/ES051650B.

- HERNÁNDEZ BENALCÁZAR, H., GAGNON, D. y DAVIDSON, R., 2015. Crecimiento y producción inicial de 15 especies de árboles tropicales de la Amazonía ecuatoriana de estados sucesionales diferentes. Institute of Environmental Sciences, Université du Québec à Montréal. Montreal, Canada, ISSN 1390 - 8928.
- HIRSCH, R.M. y SLACK, J.R., 1984. A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data With Serial Dependence. *Water Resources Research*, vol. 20, no. 6, pp. 727-732. ISSN 00431397. DOI 10.1029/WR020i006p00727.
- HOAGLIN, D., MOSTELLER, F. y TUKEY, J., 2000. Understanding robust and exploratory data analysis. ... York,[Revised and updated reprint]
- HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E., GAO, X. y FERREIRA, L..., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, vol. 83, no. 1-2, pp. 195-213. ISSN 0034-4257. DOI 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
- IPCC, 2014. Climate change 2014 : mitigation of climate change : Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. S.l.: s.n. ISBN 9781107058217.
- JENSEN, J.R., 1996. Introductory digital image processing : a remote sensing perspective. S.l.: Prentice Hall. ISBN 0132058405.
- KERLINGER, F. y LEE, H., 2002. Investigación del comportamiento. Métodos de investigación en ciencias sociales. México, DF. ,
- LABRADOR GARCIA, M., EVORA BRONDO, J.A. y ARBELO PEREZ, M., 2012. Satélites de Teledeteccion para la Gestion del Territorio. . S.l.:
- LANDIS, J.R. y KOCH, G.G., 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, vol. 33, no. 1, pp. 159. ISSN 0006341X. DOI 10.2307/2529310.



- LIU, H. y AND, A.H., 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org),
- MAITA, CHAMBA, J.A., 2015. Dinamica espacio temporal del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) en los Ecosistemas del sur del Ecuador. S.l.: s.n.
- MANN, H.B., 1945. Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, vol. 13, no. 3, pp. 245. ISSN 00129682. DOI 10.2307/1907187.
- MARROQUIN PEÑA, R., 2012. Metodología de la investigación.
- MEDINA, J., 2001. Evaluación de metodologías de detección de cambios del uso del suelo a través del análisis digital multitemporal de imágenes satelitales Landsat TM en la. S.l.: s.n.
- MÉNDEZ RIVAS, R.A., 2016. Productos de precipitación satelital de alta resolución espacial y temporal en zonas de topografía compleja. S.l.: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- MENDOZA ROBLES, J.R., 2012. Determinación de áreas deforestadas por actividades humanas en la zona de amortiguamiento de la reserva nacional Tambopata y el parque Nacional Bahuaja Sonene- Madre de Dios. S.l.: Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE, 2014. Evaluación de la Exactitud temática del mapa de deforestación. 2014. Lima: Ministerio del Ambiente.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE, 2017. Manual de buenas prácticas en minería aurífera aluvial para facilitar una adecuada recuperación de áreas. . S.l.:
- MINISTERIO DEL AMBIENTE (MINAM), 2011. Minería aurífera en madre de dios y contaminación con mercurio. . S.l.:
- MURILLO, I., QUÍLEZ, G. y JOSÉ, M., 2009. Uso del concepto de sucesión ecológica por alumnos de secundaria: La predicción de los cambios en los ecosistemas. *INVESTIGACIÓN DIDÁCTICA*, vol. 27, no. 1, pp. 19-32.

- MURPHY, A.H., 1995. The Coefficients of Correlation and Determination as Measures of performance in Forecast Verification. *Weather and Forecasting*, vol. 10, no. 4, pp. 681-688. ISSN 0882-8156. DOI 10.1175/1520-0434(1995)010<0681:TCOCAD>2.0.CO;2.
- MYNENI, R.B., KEELING, C.D., TUCKER, C.J., ASRAR, G. y NEMANI, R.R., 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, vol. 386, no. 6626, pp. 698-702. ISSN 0028-0836. DOI 10.1038/386698a0.
- NEETI, N. y EASTMAN, J.R., 2011. A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series. *Transactions in GIS*, vol. 15, no. 5, pp. 599-611. ISSN 13611682. DOI 10.1111/j.1467-9671.2011.01280.x.
- OCMAL, 2012. El oro y el apocalipsis ambiental y social en Madre de Dios / OCMAL. [en línea]. [Consulta: 16 agosto 2017]. Disponible en: <https://www.ocmal.org/el-oro-y-el-apocalipsis-ambiental-y-social-en-madre-de-dios/>.
- OSINFOR, 2014. Contribución en el monitoreo de la actividad minera en títulos habilitantes forestales, año 2014. ,
- OSORES PLENGE, F., ROJAS JAIMES, Jesus Eduardo y LARA ESTRADA, C., 2012. Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios: Un problema de salud pública. *Acta Médica Peruana*, vol. 29, no. 1, pp. 38-42. ISSN 1728-5917.
- PACHECO VILLANUEVA, D.E., 2014. Composición florística de la regeneración natural colonizadora de un área degradada por minería aurífera en el sector Teniente Acevedo-Tambopata-Madre de Dios. S.l.: s.n.
- PINTY, B. y VERSTRAETE, M.M., 1992. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, vol. 101, no. 1, pp. 15-20. ISSN 0042-3106. DOI 10.1007/BF00031911.

- PUIG POLO, C., 2015. Evolución temporal de la vegetación en el Sahel mediante el NDVI y su relación con la precipitación en el periodo 1983-2012. S.I.: Universidad Politecnica de Catalunya.
- RICHARDSON, A.J. y WIEGAND, C.L., 1977. Distinguishing Vegetation from Soil Background Information. ,
- RNTAMB, 2011. Plan Maestro Reserva Nacional Tambopata. 2011. Puerto Maldonado: s.n.
- ROBERTS, D.A., KELLER, M. y SOARES, J.V., 2003. Studies of land-cover, land-use, and biophysical properties of vegetation in the Large Scale Biosphere Atmosphere experiment in Amazônia. Remote Sensing of Environment, vol. 87, no. 4, pp. 377-388. ISSN 0034-4257. DOI 10.1016/J.RSE.2003.08.012.
- RODRIGUEZ CHAVEZ, oscar eduardo y ARREDONDO BAUTISTA, harold alberto, 2005. Manual para el manejo y procesamiento de imagenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA, aplicado en estudios de Ingenieria Civil. . S.I.:
- ROJAS FLORES, J.E., 2017. Estimación de la variabilidad espacial y temporal de la deforestación por minería aurífera aluvial en la Quebrada Guacamayo, utilizando el método de segmentación por umbrales a partir de imágenes de satélite. Universidad Nacional Mayor de San Marcos,
- ROMERO, M.K., PACHAS, V.H. y ZAMBRANO, G., 2005. Formalización de La Minería en Pequeña Escala en America Latina y el Caribe: Un Análisis de Experiencias en el Peru. . S.I.:
- SAJAMI QUISPE, E., 2017. Evaluación de la regeneración natural en áreas degradadas por la minería aurífera en el distrito de Laberinto, Tambopata-Madre de Dios. S.I.: Universidad Nacional Amazonica de Madre de Dios.
- SANTOS, D., 2017. Caracterización hidrológica de la región Madre de Dios. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). . S.I.:

- SELLERS, P.J., 1989. Vegetation-canopy spectral reflectance and biophysical processes. Wiley New York,
- SEN, P.K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. Journal of the American Statistical Association, vol. 63, no. 324, pp. 1379-1389. ISSN 0162-1459. DOI 10.1080/01621459.1968.10480934.
- SENAMHI, 2011. Guia Climática Turística. 2011. S.l.: s.n.
- SNIA SISTEMA NACIONAL DE INFORMACION AGROPECUARIA, 2018. EVI. [en línea]. [Consulta: 10 mayo 2018]. Disponible en: [http://dlibrary.snia.gub.uy/maproom/Monitoreo\\_Agroclimatico/INDICES\\_VEGETACION/EVI/EVI\\_250m/EVI.html](http://dlibrary.snia.gub.uy/maproom/Monitoreo_Agroclimatico/INDICES_VEGETACION/EVI/EVI_250m/EVI.html).
- SPERANZA, F. y ZERDA, H.R., 2002. POTENCIALIDAD DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA LA DISCRIMINACIÓN DE COBERTURAS FORESTALES. ,
- STUART, A., 1956. Rank Correlation Methods. By M. G. Kendall, 2nd edition. British Journal of Statistical Psychology, vol. 9, no. 1, pp. 68-68. ISSN 0950561X. DOI 10.1111/j.2044-8317.1956.tb00172.x.
- SWENSON, J.J., CARTER, C.E., DOMEQ, J. y DELGADO, C.I., 2011. Gold Mining in the Peruvian Amazon : Global Prices , Deforestation , and Mercury Imports. , vol. 6, no. 4. DOI 10.1371/journal.pone.0018875.
- THEIL, H., 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, 3; confidence regions for the parameters of polynomial regression equations. Indagationes Mathematicae, vol. 1, no. 2, pp. 467-482.
- TOWERS, P.C., 2002. Conceptos Iniciales sobre Teledetección y su Aplicación al Agro. [en línea]. [Consulta: 9 mayo 2018]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/68699412/Conceptos-Iniciales-sobre-Teledeteccion-y-su-Aplicacion-al-Agro>.
- VICENTE SERRANO, S.M., BEGUERIA, S. y LASANTA, T., 2006. Diversidad

espacialde la actividad vegetal en campos abandonados del pirineo central español: análisis de los procesos de sucesión mediante imágenes landsat (1984-2001). , pp. 59-84.

VON STORCH, H. y ZWIERS, F.W., 1999. Statistical Analysis in Climate Research. S.I.: CAMBRIDGE UNIVERSITY. ISBN 0 511 01018 4.

VOSS, R.S. y EMMONS, L., 1996. Mammalian diversity in Neotropical lowland rainforests: a preliminary assessment. Bulletin of the AMNH; no. 230. AMERICAN MUSEUM OF NATURAL HISTORY, DOI 0003-0090.

WILKS, D.S., 2011. Statistical methods in the atmospheric sciences. S.I.: Academic Press. ISBN 9780123850225.

XIAO, X., BOLES, S., LIU, J., ZHUANG, D., FROLKING, S., LI, C., SALAS, W. y MOORE, B., 2005. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. Remote Sensing of Environment, vol. 95, no. 4, pp. 480-492. ISSN 0034-4257. DOI 10.1016/J.RSE.2004.12.009.

ZHONGMING, W., LEES, B.G., FENG, J., WANNING, L. y HAIJING, S., 2010. Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion. CATENA, vol. 83, no. 1, pp. 87-93. ISSN 0341-8162. DOI 10.1016/J.CATENA.2010.07.006.

## ANEXOS

### Anexo 1: Formato de campo para validación.

#### MATRIZ DE VALICACION DE CAMPO

Código del punto de muestreo:

Fecha y hora

Zona:

Descripción general:

TIPO DE COBERTURA	MARCAR (X)	OBSERVACIONES
Cuerpos De Agua		
Deforestación (Minería)		
Brinzales (Pastizales, Hiervas, Etc.)		
Latizales		
Fustales		

Puntos (a 25 m del punto central):

Puntos GPS	ESTE	NORTE	SUR
Coordenada			

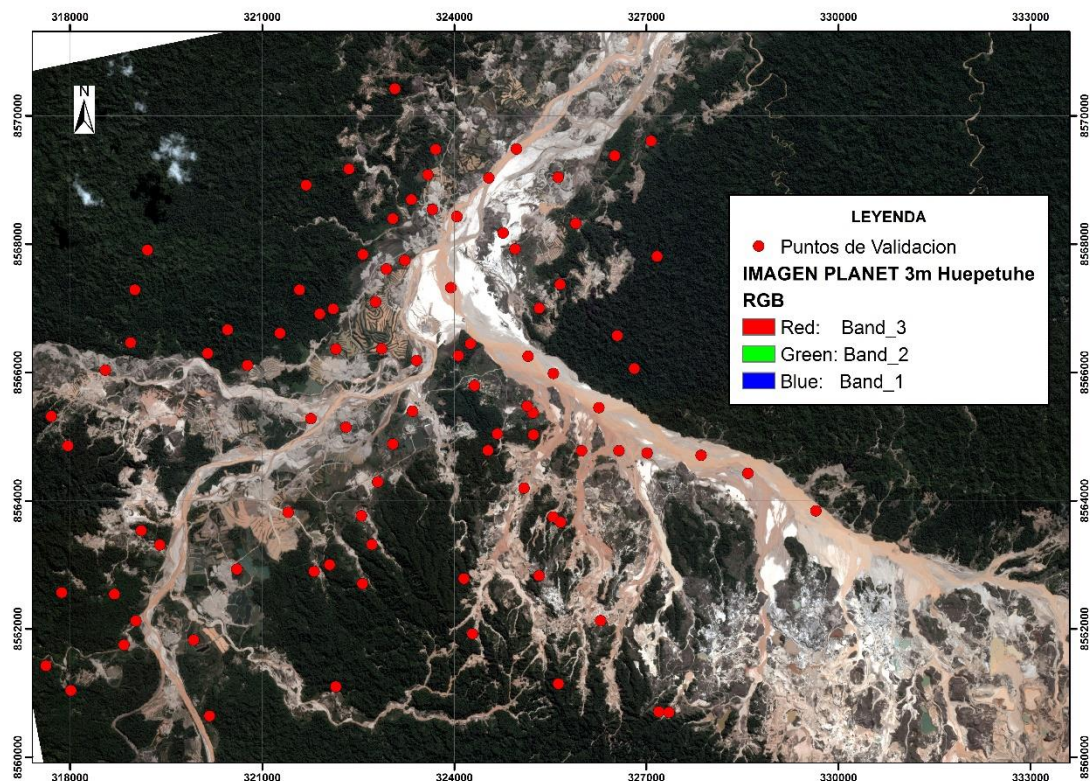
Registro fotográfico:

Punto central	ESTE	NORTE	SUR
Código de la foto			

Observaciones:

Fuente: Tomado y adaptado MINAM (2013).

## Anexo 2: Mapa de dispersión de puntos de validación y tabla de coordenadas.



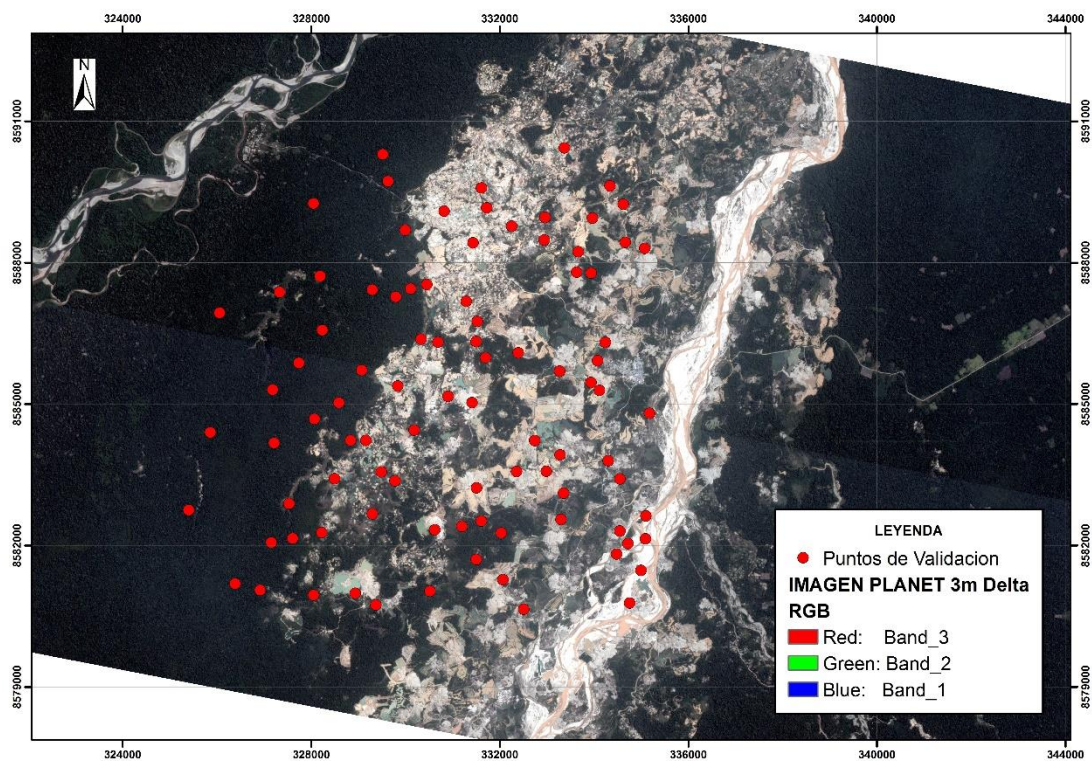
Mapa 1: Dispersión de puntos de validación zona Huepetuhe.

Tabla 1: Coordenadas de puntos de validación zona Huepetuhe.

OBJECTID	type	Y_COORD	X_COORD	OBJECTID	type	Y_COORD	X_COORD
1	WAYPOINT	8569376.05	326505.027	47	WAYPOINT	8566181.92	323411.907
2	WAYPOINT	8569607.04	327071.97	48	WAYPOINT	8568395.05	323039.844
3	WAYPOINT	8569477.03	323708.025	49	WAYPOINT	8562541.11	318688.814
4	WAYPOINT	8569081.07	323584.992	50	WAYPOINT	8563532.76	319109.787
5	WAYPOINT	8568694.02	323331.042	51	WAYPOINT	8568322.26	325896.619
6	WAYPOINT	8567836.98	322571.959	52	WAYPOINT	8567746.95	323226.329
7	WAYPOINT	8566444	324251.043	53	WAYPOINT	8560699.43	327352.921
8	WAYPOINT	8566260.06	324065.047	54	WAYPOINT	8567609.34	322935.449
9	WAYPOINT	8565792.01	324313.011	55	WAYPOINT	8562894.76	321810.946
10	WAYPOINT	8565367	325228.057	56	WAYPOINT	8564775.54	325986.414
11	WAYPOINT	8565027.07	325233.025	57	WAYPOINT	8569033.9	324540.379
12	WAYPOINT	8565041.99	324671.033	58	WAYPOINT	8570421.24	323071.093
13	WAYPOINT	8564781.97	324525.02	59	WAYPOINT	8564423.96	328586.981

14	WAYPOINT	8562702.99	322566.031	60	WAYPOINT	8566609.89	321276.002
15	WAYPOINT	8562999.03	322049.025	61	WAYPOINT	8563764.37	322550.266
16	WAYPOINT	8563316.05	322713.004	62	WAYPOINT	8569040.39	325620.373
17	WAYPOINT	8563815.99	321404.963	63	WAYPOINT	8562784.11	324150.564
18	WAYPOINT	8566109.04	320768.99	64	WAYPOINT	8567372.58	325651.361
19	WAYPOINT	8560708.02	327192.983	65	WAYPOINT	8568920.68	321685.884
20	WAYPOINT	8566989	322107.02	66	WAYPOINT	8566362.74	322152.084
21	WAYPOINT	8563839.12	329645.2	67	WAYPOINT	8564741.58	327011.349
22	WAYPOINT	8565473.75	325138.199	68	WAYPOINT	8561749.47	318839.444
23	WAYPOINT	8568538.67	323658.212	69	WAYPOINT	8564778.71	326573.246
24	WAYPOINT	8568173.63	324762.866	70	WAYPOINT	8567923.11	324949.325
25	WAYPOINT	8565394.17	323344.571	71	WAYPOINT	8566998.93	325326.435
26	WAYPOINT	8567806.48	327167.667	72	WAYPOINT	8565145.24	322306.344
27	WAYPOINT	8566369.82	322864.044	73	WAYPOINT	8569170.26	322355.284
28	WAYPOINT	8568428.75	324038.952	74	WAYPOINT	8564882.28	323039.916
29	WAYPOINT	8561143.92	325624.633	75	WAYPOINT	8562566.93	317868.085
30	WAYPOINT	8569482.75	324968.975	76	WAYPOINT	8567321.43	323946.964
31	WAYPOINT	8566912.56	321897.598	77	WAYPOINT	8564854.61	317963.337
32	WAYPOINT	8563747.01	325540.888	78	WAYPOINT	8562829.14	325321.962
33	WAYPOINT	8567286.55	319008.343	79	WAYPOINT	8565449.65	326258.575
34	WAYPOINT	8567285.39	321580.802	80	WAYPOINT	8565983.51	325547.351
35	WAYPOINT	8567909.11	319207.484	81	WAYPOINT	8566295.64	320147.92
36	WAYPOINT	8561098.76	322146.36	82	WAYPOINT	8563664.26	325662.418
37	WAYPOINT	8566034.3	318548.913	83	WAYPOINT	8565277.22	321761.749
38	WAYPOINT	8562123.53	319023.3	84	WAYPOINT	8566664.69	320456.218
39	WAYPOINT	8567096.88	322768.89	85	WAYPOINT	8564194.8	325087.492
40	WAYPOINT	8566251.02	325153.484	86	WAYPOINT	8561826.07	319930.907
41	WAYPOINT	8564290.69	322802.704	87	WAYPOINT	8562128.51	326286.364
42	WAYPOINT	8562928.35	320601.992	88	WAYPOINT	8561423.56	317619.907
43	WAYPOINT	8566463.84	318941.873	89	WAYPOINT	8566059.11	326810.419
44	WAYPOINT	8563311.02	319399.137	90	WAYPOINT	8561040.87	318010.028
45	WAYPOINT	8564705.26	327855.739	91	WAYPOINT	8560641.23	320175.201
46	WAYPOINT	8565315.9	317704.946	92	WAYPOINT	8561924.2	324282.388



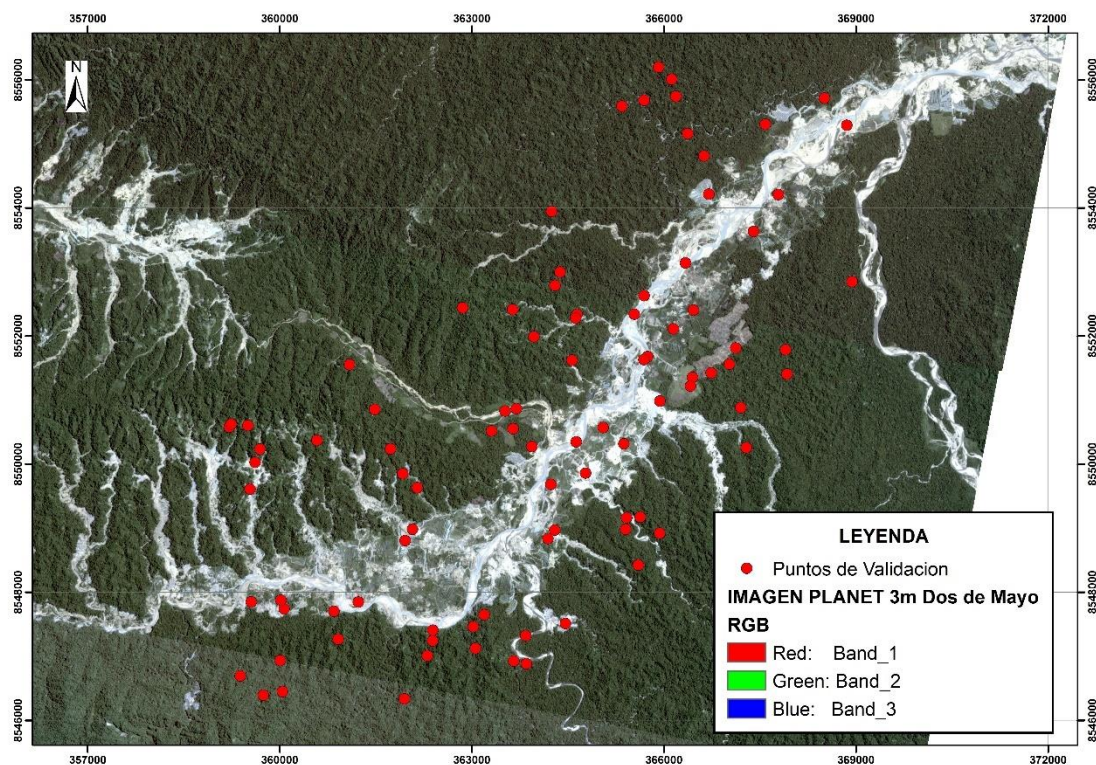


Mapa 2: Dispersión de puntos de validación zona Delta.

Tabla 2: Coordenadas de puntos de validación zona Delta.

OBJETIBID	X_COORD	Y_COORD	OBJETIBID	X_COORD	Y_COORD
1	332991.85	8583573.76	47	334115.979	8585293.57
2	328220.99	8582273.61	48	334076.344	8585922.65
3	330622.846	8582329.96	49	327176.635	8585303.13
4	327532.02	8582885.83	50	326056.981	8586934.04
5	333301.194	8582550.86	51	327603.737	8582148.6
6	331499.089	8581702.28	52	329294.406	8587424.39
7	327212.015	8584173.68	53	328931.666	8580987.13
8	329072.008	8585716.56	54	334550.14	8582306.95
9	333938.774	8587780.73	55	333966.317	8588943.69
10	330904.567	8585164.77	56	331723.619	8589160.62
11	332255.028	8588772.65	57	330329.526	8586374.36
12	335179.901	8584804.06	58	328067.803	8584683.82
13	325858.826	8584398.16	59	333939.876	8585458.79
14	333634.022	8587796.71	60	331697.79	8585982
15	326382.563	8581189.12	61	330518.983	8581031.89

16	330821.805	8589090.48	62	328833.938	8584227.71
17	333665.771	8588232.69	63	331499.478	8586324.59
18	334663.385	8588429.74	64	329991.847	8588691.22
19	331434.78	8588421.03	65	333369.847	8590433.51
20	334718.739	8582039.64	66	334758.401	8580778.66
21	332962.191	8588960.71	67	329518.824	8590297.87
22	331287.861	8587181.19	68	331508.978	8583223.09
23	329776.763	8583370.03	69	328188.934	8587711.87
24	326912.059	8581052.06	70	325398.907	8582750.83
25	330108.124	8587444.79	71	333270.809	8585697.07
26	332393.16	8586087.06	72	334623.394	8589235.43
27	332743.951	8584223.47	73	334478.917	8581819.88
28	331412.742	8585031.64	74	333279.055	8583923.14
29	327155.354	8582062.67	75	332943.452	8588480.93
30	332066.518	8581275.16	76	329162.161	8584226.64
31	334242.541	8586309.17	77	331606.341	8582516.58
32	328236.069	8586565.68	78	334552.468	8583413.23
33	330184.251	8584445.58	79	330452.579	8587536.16
34	329794.82	8587274.66	80	334996.116	8581468.69
35	329630.019	8589724.73	81	333353.814	8583109.6
36	329371.122	8580736.48	82	328046.672	8589251.5
37	335101.397	8582624.49	83	334300.795	8583798.29
38	328494.279	8583415.24	84	332030.437	8582264.65
39	335091.662	8582140.38	85	327328.395	8587373.79
40	329837.22	8585382.97	86	334338.33	8589627.73
41	332356.504	8583570.79	87	329489.392	8583560.51
42	331524.799	8586754.86	88	327738.168	8585872.86
43	332508.766	8580646.12	89	330689.427	8586313.25
44	328586.51	8585028.46	90	331610.515	8589585.81
45	335076.342	8588299.99	91	328046.582	8580948.73
46	331197.566	8582407.29	92	329297.435	8582670.38



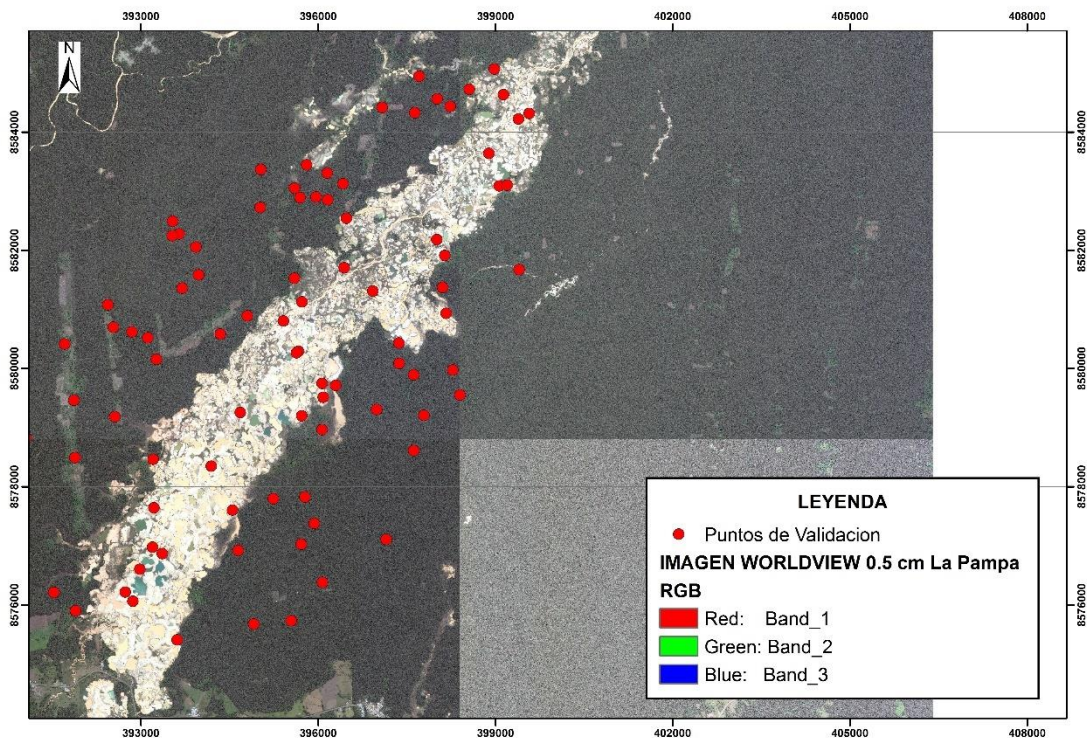
Mapa 3: Dispersión de puntos de validación zona Dos de Mayo.

Tabla 3: Coordenadas de puntos de validación zona Dos de Mayo.

FID	X_COORD	Y_COORD	FID	X_COORD	Y_COORD
1	366445.081	8551350.78	47	364461.437	8547510.88
2	365597.366	8548422.48	48	364297.623	8552787.5
3	366185.25	8555740.58	49	366413.942	8551218.66
4	363054.852	8547123.49	50	364776.628	8549859.8
5	365934.673	8548921.67	51	361957.086	8548803.7
6	365915.445	8556196.75	52	360003.715	8546933.55
7	367919.777	8551402.56	53	362390.43	8547406.12
8	360041.431	8546445.8	54	360845.431	8547703.01
9	367288.189	8550254.23	55	363637.749	8552411.34
10	365342.411	8555587.51	56	365372.261	8550314.85
11	364295.29	8548969.63	57	360066.684	8547737.72
12	359689.378	8550233.44	58	365938.307	8550983.68
13	367021.582	8551559.59	59	359382.177	8546692.4

14	365746.142	8551677.69	60	367787.348	8554206.98
15	359500.958	8550602.76	61	366336.652	8553139.61
16	362147.345	8549630.89	62	364245.998	8553945.18
17	363848.36	8546880.64	63	363693.324	8550865.68
18	362072.626	8548980.98	64	361481.747	8550853.14
19	362306.065	8547008.22	65	365628.921	8549172.26
20	366460.974	8552403.94	66	367899.94	8551783.55
21	365049.869	8550568.41	67	359740.965	8546391.18
22	365537.74	8552340.19	68	363307.159	8550517.98
23	361226.844	8547843.62	69	365688.465	8551629.85
24	364628.28	8550347.44	70	363191.617	8547648.16
25	364641.519	8552335.7	71	363841.408	8547319.62
26	368857.336	8555288.76	72	364375.293	8552998.3
27	362385.69	8547242.34	73	361920.547	8549850.81
28	363936.129	8550273.52	74	364234.087	8549683.18
29	365690.693	8555677.62	75	366700.291	8554212.9
30	364561.219	8551620.46	76	361086.662	8551553.14
31	361946.408	8546332.95	77	366625.57	8554811.59
32	366370.967	8555157.06	78	359553.091	8547848.64
33	361727.682	8550236.27	79	360014.958	8547875.34
34	364621.933	8552279.93	80	366147.029	8552110.62
35	363641.351	8550552.26	81	366739.038	8551422.62
36	367400.175	8553631.72	82	359534.993	8549608.9
37	359614.039	8550025.64	83	359211.868	8550577.16
38	366119.378	8556007.72	84	367120.849	8551813.57
39	363021.159	8547462.27	85	364189.025	8548836.38
40	365688.861	8552630.38	86	363967.944	8551988.94
41	360913.197	8547266.97	87	367197.672	8550879.14
42	360579.311	8550371.97	88	363516.454	8550826.83
43	368505.801	8555711.62	89	365417.159	8549161.52
44	368939.339	8552848.69	90	365401.043	8548981.65
45	363653.413	8546924.6	91	359239.298	8550625.25
46	362856.457	8552439.09	92	367582.282	8555303.34

d



Mapa 4: Dispersión de puntos de validación zona La Pampa.

Tabla 4: Coordenadas de puntos de validación zona La Pampa.

FID	X_COORD	Y_COORD	FID	X_COORD	Y_COORD
1	396072.941	8576383.14	47	394648.019	8576919.79
2	396924.744	8581307.35	48	396151.222	8583304.54
3	390985.998	8577962.22	49	392440.275	8581076.02
4	393196.826	8576975.93	50	395019.599	8582726.05
5	397368.677	8580430.13	51	391526.496	8576211.85
6	394910.656	8575675.28	52	395598.922	8581527.53
7	394192.073	8578346.61	53	398888.391	8583637.83
8	395029.898	8583364.98	54	392562.082	8579182.57
9	396065.3	8579747.77	55	398141.459	8581914.31
10	395411.82	8580802.03	56	393222.093	8577644.63
11	396296.688	8579715.75	57	392864.991	8576061.76
12	391713.524	8580413.88	58	396161.463	8582852.99

13	396086.456	8579512.43	59	395805.817	8583445.22
14	396443.202	8581704.26	60	398559.124	8584721.03
15	397616.669	8579893.61	61	393208.096	8578462.64
16	395692.457	8582891.05	62	396480.527	8582540.71
17	395239.579	8577795.48	63	399137.872	8584631.46
18	389832.305	8575946.51	64	393614.069	8575409.34
19	394347.912	8580582.71	65	397788.506	8579208.58
20	396066.401	8578965.89	66	398107.469	8581371.5
21	395712.606	8577025.7	67	393115.747	8580519.4
22	395727.36	8581125.5	68	392534.655	8580697.14
23	392736.982	8576219.08	69	393978.349	8581581.77
24	398014.035	8584559.82	70	398234.432	8584431.47
25	394684.819	8579254.8	71	398008.17	8582178.57
26	395667.54	8580292.57	72	394549.599	8577603.34
27	397617.846	8578611.54	73	398167.562	8580932.82
28	393536.436	8582489.41	74	392850.39	8580619.52
29	391883.141	8578493.3	75	391866.638	8579463.15
30	395935.115	8577381.48	76	393531.944	8582244.62
31	398399.846	8579552.93	77	397082.095	8584415.89
32	393646.743	8582275.41	78	399572.417	8584312.64
33	390581.398	8577748.07	79	397371.94	8580083.24
34	397635.83	8584326.91	80	395635.42	8580265.18
35	395601.231	8583050.23	81	395776.787	8577826.44
36	395963.163	8582900.76	82	394803.627	8580888.23
37	399390.439	8584221.11	83	397710.042	8584944.72
38	393930.025	8582055.47	84	396989.651	8579303.29
39	398278.758	8579973.83	85	397153.419	8577110.21
40	393361.981	8576867.8	86	391058.427	8578824.44
41	393262.746	8580157.78	87	390436.784	8578436.84
42	393700.458	8581358.04	88	399199.094	8583099.68
43	398982.635	8585064.09	89	395723.487	8579198.12
44	396418.359	8583124.07	90	395545.535	8575733.64
45	399064.626	8583087.55	91	391894.285	8575902.57
46	399401.455	8581673.02	92	392982.205	8576604.94

Anexo 3: Fotos de validación en campo.



Foto 1



Foto 2



Foto 3



Foto 4



Foto 5



Foto 6



Foto 7



Foto 8



Foto 9

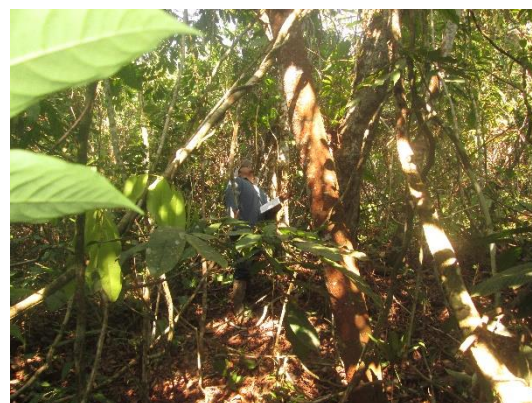


Foto 10



Foto 11



Foto 12