



Distribución espacial y temporal del cambio del uso del suelo generado por la actividad minera en el departamento de Ancash (1991-2018)

Spatial and temporal distribution of land use change generated by mining activity in the Ancash department (1991-2018)

Edison Cholan Rodríguez^{1*}; Ever Menacho Casimiro¹

¹ Departamento de Física y Meteorología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.. Email: echolan@lamolina.edu.pe; emenacho@lamolina.edu.pe

Recepción: 29/08/2017; Aceptación: 15/05/2020

Resumen

El objetivo de esta investigación es de analizar y cuantificar la variación espacio temporal de la degradación de la cobertura vegetal y del agua, debido a la actividad minera de la mina Antamina, ubicada en la provincia de Huari, región Ancash, entre los años 1991 y 2018. Se utilizaron las imágenes satelitales Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI y ASTER, con las cuales se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de agua de diferencia normalizado (NDWI). Estos índices se utilizaron para realizar el análisis temporal y la cuantificación de la cobertura vegetal y del agua degradada, para el periodo de estudio 1991-2018, utilizando el método de segmentación por umbrales. Este método consiste en agrupar píxeles para un mismo tipo de cobertura y permitiendo definir las áreas degradadas por la actividad minera, para finalmente realizar el análisis espacial y temporal. Los resultados muestran que la degradación de la cobertura vegetal y del agua debido a la actividad minera comenzó entre los años 2000 y 2001. Durante el periodo 2000-2018, se determinó una tasa de crecimiento anual del área de la mina de tajo abierto, incluyendo los botaderos de desmonte de 67,91 ha/año y también se determinó una tasa de crecimiento anual de la presa de relave minero de 29,142 ha/año. Los resultados obtenidos cumplen con el objetivo de analizar y cuantificar la variación espacio temporal de la degradación de la cobertura vegetal y del agua, debido a la actividad minera de la mina Antamina.

Palabras clave: Laguna; mina; Antamina; NDVI; NDWI; Perú; Degradación.

Forma de citar el artículo: Cholan, E.; Menacho, E. 2020. Rodríguez Distribución espacial y temporal del cambio del uso del suelo generado por la actividad minera en el departamento de Ancash (1991-2018). Anales Científicos 81 (1):183-203 (2020). <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v81i1.1588>

DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v81i1.1588>

Autor de correspondencia (*): Edison Cholan Rodríguez. Email: echolan@lamolina.edu.pe
© Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Abstract

The objective of this research is to analyze and quantify the temporal space variation of the degradation of the vegetal cover and of the water, due to the mining activity of the Antamina mine, located in the province of Huari, Ancash region, between 1991 and 2018. Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI and ASTER satellite images were used, with which the normalized difference vegetation index (NDVI) and the normalized difference water index (NDWI) were calculated. These indices were used to perform the temporal analysis and quantification of the vegetation cover and degraded water, for the study period 1991-2018, using the threshold segmentation method. This method consists of grouping pixels for the same type of coverage and allowing defining the areas degraded by mining activity, to finally carry out the spatial and temporal analysis. The results show that the degradation of the vegetal cover and of the water due to the mining activity began between the years 2000 and 2001. During the period 2000-2018, an annual growth rate of the open pit mine area was determined, including the waste dumps of 67,91 ha /year and an annual growth rate of the mining tailings dam was also determined of 29,142 ha/year. The results obtained comply with the objective of analyzing and quantifying the temporal space variation of the degradation of the vegetation cover and of the water, due to the mining activity of the Antamina mine.

Keywords: Lagoon; mine; Antamina; NDVI; NDWI; Peru; Degradation.

1. Introducción

La minería es una de las industrias que más ingresos le proveen al estado peruano, y se ha visto favorecida por los sucesivos gobiernos como el tipo de inversión que hará que el Perú salga de la trampa del subdesarrollo. Sin embargo, el crecimiento económico derivado de las ganancias generadas por ella no se ha materializado en muchos ámbitos que están dentro de la influencia directa de los grandes proyectos mineros, sino por el contrario, las comunidades y las regiones directamente involucradas se han visto negativamente afectadas, tanto en su medio ambiente como en la salud de la gente (Ross, 2001). El impacto que la minería ejerce sobre el medio ambiente y sobre las comunidades en donde opera son enormes y casi siempre terminan dejando a las tierras afectadas, inútiles para cualquier uso que se les intente dar. En el mismo informe del Banco Mundial se señala el daño ocasionado al medio ambiente y las limitaciones en el uso y la distribución de los ingresos producto de la minería (Aramayo, 2009). Los recursos hídricos han sido tradicionalmente los recursos naturales

más afectados por la contaminación de las actividades mineras en el país (Núñez y Castañeda, 1999). Esto debido a que el agua es un insumo indispensable en el proceso productivo minero, el cual es combinado con reactivos químicos (cianuro, arsénico, etc.) para separar el metal de la roca y así obtener el mineral con valor comercial. Como resultado de este proceso, se generan desechos de roca triturada, agua y reactivos químicos residuales (denominados 'relaves mineros'), los cuales debido a un inadecuado tratamiento, frecuentemente alcanzan a las fuentes hídricas aledañas a las operaciones mineras (ríos, lagos y/o lagunas) generándose así la contaminación ambiental en los recursos hídricos (Herrera y Millones, 2011). La mina de tajo abierto Antamina produce concentrados de cobre, zinc y molibdeno. La laguna Antamina se encontraba sobre el depósito de mineral y fue drenada antes de la explotación minera. La laguna Antamina tenía 32 ha de extensión, con una profundidad máxima de 51 m y una capacidad máxima de almacenamiento de $9,6 \times 10^6 \text{m}^3$ (Knight Piésold Consultores S.A.,

1999). Según la Compañía Minera Antamina S.A el tajo final tendría aproximadamente 1700 m de diámetro y 465 m de profundidad por debajo del piso actual del valle (Knight Piésold Consultores, 1999). Esta mina cuenta con una gigantesca presa de relaves con capacidad para almacenar 550 millones de toneladas de relaves, o 330 millones de metros cúbicos durante 23 años de vida útil y se encuentra ubicada en la cabecera de la quebrada Huincush (afluente del río Ayash) (Ingemmet, 2009). Las actividades mineras realizadas por Antamina han alterado el estado natural de la cobertura vegetal y la cobertura del agua debido a la construcción de caminos, presa de relaves, botaderos de desmonte y el desarrollo de excavaciones a la intemperie. El objetivo de esta investigación es la de analizar la variación espacio temporal de la degradación de la cobertura vegetal y del agua, debido a la actividad minera, entre los años 1991 y 2018, para los cuales se utilizaron imágenes de satélite Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI y ASTER, utilizando el método de segmentación por umbrales.

2. Materiales y métodos

Ubicación geográfica

La mina de tajo abierto Antamina, se encuentra ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huari, región Ancash (Siña, 2008) (Figura 1a). En la Figura 1b se muestra la ubicación de la laguna Antamina, para el año 1991, con una extensión de 32 ha, y la mina de tajo abierto para el año 2018 (Figura 1c).

Datos utilizados

Las imágenes satelitales utilizadas fueron de los sensores TM y OLI, a bordo de los satélites Landsat 5 y Landsat 8 respectivamente, a una resolución espacial de 30 m x 30 m, en formato GEOTIFF como producto de nivel L1T, que significa que tiene una corrección estándar de terreno. También se utilizaron

imágenes ASTER nivel 1 en formato HDF a una resolución espacial de 15 m x 15 m. Estas imágenes fueron obtenidas del servidor United States Survey (USGS, 2016a). En total se utilizaron 50 imágenes para el periodo de estudio 1991-2018, 36 imágenes del satélite Landsat 5, 7 imágenes del satélite Landsat 8 y 7 imágenes ASTER. Estas imágenes tienen como Path/Row 8/67.

Metodología

Las imágenes obtenidas de los sensores TM y OLI, a bordo de los satélites Landsat 5 y Landsat 8 respectivamente, contienen la data almacenada en formato 8-bit (0 a 255) llamado número digital (ND). Se realizó la corrección radiométrica al convertir los números digitales (ND) a valores de radiancia espectral. Para obtener información sobre la superficie terrestre es necesario realizar una corrección atmosférica de los datos de la imagen. Por lo tanto se realizó la corrección atmosférica en el espectro visible utilizando el modelo Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH) para obtener la reflectancia de la superficie terrestre a partir de los datos de radiancia espectral. A partir de la reflectancia de la superficie terrestre se obtuvo el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI).

Cálculo del índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Se utilizó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), para realizar el análisis espacial y temporal de la cobertura vegetal y del agua. El índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) es utilizado ampliamente para mejorar la discriminación de cubiertas vegetales, medir el vigor de las plantas y la producción de la biomasa. (Gilbert *et al.*, 1997). El NDVI es

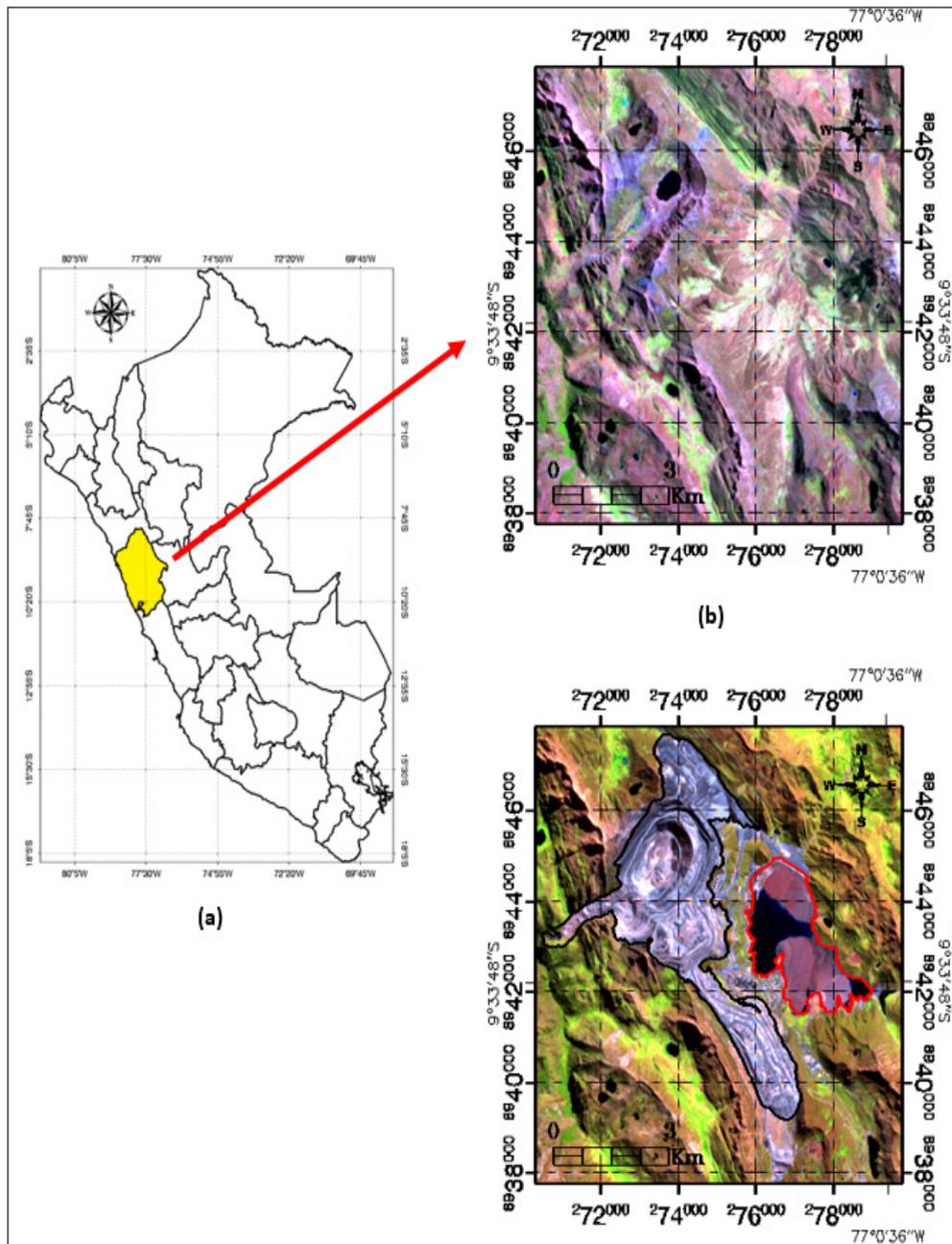


Figura 1. Ubicación de la mina de rajo abierto Antamina (a), la laguna Antamina para el año 1991 (b), con una extensión de 32 ha, y la mina de rajo abierto para el año 2018 (c)

el índice de vegetación más utilizado para todo tipo de aplicaciones, además de ser un indicador de vigor fotosintético o salubridad vegetal. La razón fundamental es su sencillez de cálculo, y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y +1) (Sánchez *et al.*, 2000). Para las imágenes de los sensores TM y ETM+, el NDVI se calcula a partir de las bandas 4 y 3 (Rouse *et al.*, 1974).

$$NDVI_{TM-ETM+} = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3}$$

Donde p_4 y p_3 son las reflectancias en las bandas del infrarrojo cercano y del rojo visible respectivamente. Para las imágenes del sensor OLI, el NDVI se calcula a partir de las bandas 5 y 4 (USGS, 2016b).

$$NDVI_{OLI} = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4}$$

Donde p_5 y p_4 son las reflectancias en las bandas infrarrojo cercano y del rojo visible respectivamente.

Cálculo del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

El índice del agua de diferencia normalizada (NDWI) es calculado a partir de las mediciones de la reflectancia en el verde y de la reflectancia en el Infrarrojo de onda corta, en la región del espectro electromagnético. Los valores obtenidos a partir del NDWI oscilan entre -1 y 1, cuyos valores describirán superficies de agua y vegetación con contenido en agua o superficies terrestres y con ausencia de humedad, esta relación de bandas maximiza la reflectancia del agua en el visible (verde), mientras que se maximiza la reflectancia de la vegetación y minimiza la reflectancia de masas de agua gracias al infrarrojo de onda corta (SWIR) (Xu, 2006).

Para las imágenes de los sensores TM y ETM+, el NDWI se calcula a partir de las bandas 2 y 5 (Xu, 2006).

$$NDWI_{TM-ETM+} = \frac{\rho_2 - \rho_5}{\rho_2 + \rho_5}$$

Donde p_2 y p_5 son las reflectancias en las bandas del verde y el infrarrojo de onda corta respectivamente. Para las imágenes del sensor OLI, el NDWI se calcula a partir de las bandas 3 y 6 (Xu, 2006).

$$NDWI_{OLI} = \frac{\rho_3 - \rho_6}{\rho_3 + \rho_6}$$

Donde p_3 y p_6 son las reflectancias en las bandas del verde y el infrarrojo de onda corta respectivamente.

Segmentación de las superficies degradadas aplicando selección de umbrales

La estimación de las superficies degradadas por la actividad minera, se realizó a partir de imágenes clasificadas mediante el método de segmentación por umbrales. Este método consiste en la agrupación de píxeles para un mismo tipo de cobertura y permitiendo definir las áreas degradadas por la actividad minera (Rojas, 2017). Posteriormente el cálculo de estas áreas clasificadas como coberturas degradadas de vegetación y de agua, fue realizado con ayuda del software ENVI. Para ello se utilizó la siguiente ecuación para estimar las superficies degradadas por la actividad minera (Rojas, 2017). Este método se aplicó para las imágenes de NDVI y de NDWI.

$$\text{Área de cobertura (ha)} = \frac{\text{número de píxeles} \cdot \text{área del píxel}}{10000}$$

donde, área del pixel, es la resolución espacial (30 m x 30 m) de las imágenes de los sensores TM y OLI (Landsat), equivalente a 9000 m² y (15 m x 15 m) para las imágenes ASTER, equivalente a 225 m², el número de pixeles es la cantidad de píxeles que se encuentran dentro de las áreas segmentadas, clasificadas como superficies degradadas por la actividad minera. La estimación de la cobertura vegetal y del agua degradadas por la actividad minera, depende básicamente del número de píxeles obtenidos en la clasificación de las superficies degradadas por la actividad minera, mediante el método de segmentación por umbrales (Rojas, 2017).

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis temporal

Luego de haber estimado el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), realizando las respectivas combinaciones de bandas a partir de las imágenes satelitales en valores de reflectancia de superficie, se realizó el reconocimiento de las áreas de interés donde estaba ubicada la laguna Antamina (contorno rojo) y ahora es una mina de tajo abierto (contorno verde), para luego realizar el análisis espacio temporal de la degradación de la cobertura vegetal y del agua (Figura 2). Las primeras cuatro áreas (Área 1, Área 2, Área 3, Área 4) se encuentran alrededor de la laguna con alta cobertura vegetal y para su análisis se utilizó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Figura 2a), mientras que las cuatro siguientes áreas de interés (Área 5, Área 6, Área 7, Área 8) se ubican dentro de los límites de la laguna Antamina y para su análisis se utilizó el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) (Figura 2b)

En la Figura 2a se visualiza una imagen de NDVI para el año 1997, donde se determinó que el umbral superior es de 1,0

y el umbral inferior de -0,9, la Figura 2a muestra los cuerpos de agua como la laguna Antamina (superficie de color azul), con valores entre -0,9 y 0,0, los suelos desnudos entre 0,0 y 0,2, los suelos sin vegetación entre 0,2 y 0,4, la vegetación en regular estado entre 0,4 y 0,6, la vegetación en buen estado entre 0,6 y 0,8 y la vegetación en muy buen estado entre 0,8 y 1,0.

En la Figura 2b se visualiza la reflectancia de la superficie terrestre de una imagen satelital Landsat 8 para el año 2018, donde se observa la mina de tajo abierto Antamina (contorno verde), las superficies degradadas por la actividad minera y sus botaderos de desmonte. En esta Figura 2b también se observa que el aumento de las superficies degradadas por la actividad minera y sus botaderos de desmonte, ha sido en dirección hacia el sur.

Esta imagen satelital Landsat 8 en valores de reflectancia de superficie terrestre, se obtuvo luego de haber realizado la corrección atmosférica en el espectro visible, utilizando el modelo Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH), a partir de la imagen satelital Landsat 8 en valores de radiancia espectral.

Variación temporal del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

En la Figura 3a se muestra la distribución temporal del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), para un pixel de 30 m x 30 m de resolución espacial, denominadas Área 1, Área 2, Área 3 y Área 4, donde se puede visualizar una disminución de la cobertura vegetal de 0,3 a 0,01, esta disminución de cobertura vegetal se debe a la actividad minera. Se observa en la gráfica Tiempo vs. NDVI una disminución de los valores del NDVI a partir del año 1997. Esta disminución de la cobertura vegetal debido a la acción minera, se hace presente en el estudio de impacto ambiental realizado por

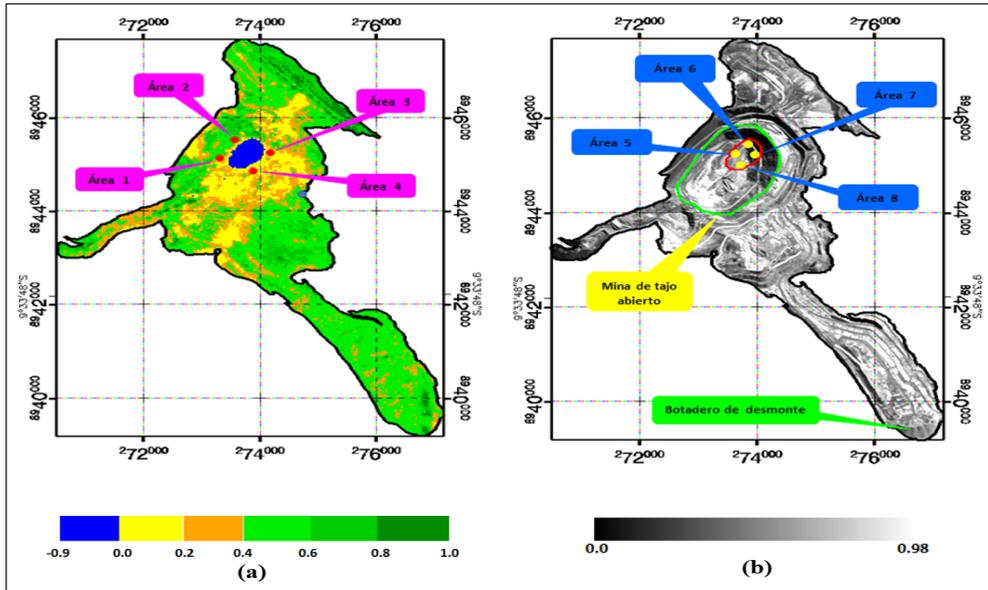


Figura 2. Áreas de interés para analizar el (a) índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el (b) índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

Knight Piésold Consultores S.A. (Knight Piésold Consultores S.A., 1999).

Variación temporal del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

En la **Figura 3b** se muestra la distribución temporal del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), para un pixel de 30 m x 30 m de resolución espacial, denominadas Área 5, Área 6, Área 7 y Área 8, donde se puede visualizar una disminución de la cobertura del agua (laguna Antamina), representada por el aumento de los valores del NDWI de -0,9 a 0,4. Esta disminución de la cobertura del agua (laguna Antamina), se debe a que la laguna fue drenada antes de la explotación minera, esto debido a que esta laguna se encontraba sobre el depósito de mineral, tal como se informa en el estudio de impacto ambiental realizado por Knight Piésold Consultores S.A. (Knight Piésold Consultores S.A., 1999). En la gráfica Tiempo vs. NDWI, se observa un aumento de valores del NDWI a partir del año 2003.

Variación temporal del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) del relave minero

También se realizó el reconocimiento de las áreas de interés llamadas ‘ZONAS’ donde está ubicado la presa de relave (**Figura 4a** y **4b**), para realizar el análisis espacio temporal de la degradación de la cobertura vegetal y del agua, y poder verificar que la variación temporal de los relaves es distinto en diferentes zonas de la presa, debido a la playa de relave formado.

En la **Figura 5a** se muestra la distribución temporal del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), para un pixel de 30 m x 30 m de resolución espacial, denominadas Zona 1, Zona 2, Zona 3 y Zona 4, donde se puede visualizar una disminución de la cobertura vegetal de 0,6 a -1,0, debido al relave minero, para luego aumentar a valores de 0,4, debido a la playa de relave formado. Se observa en la gráfica Tiempo vs. NDWI una alta disminución de los valores de NDWI entre los años 2001 y

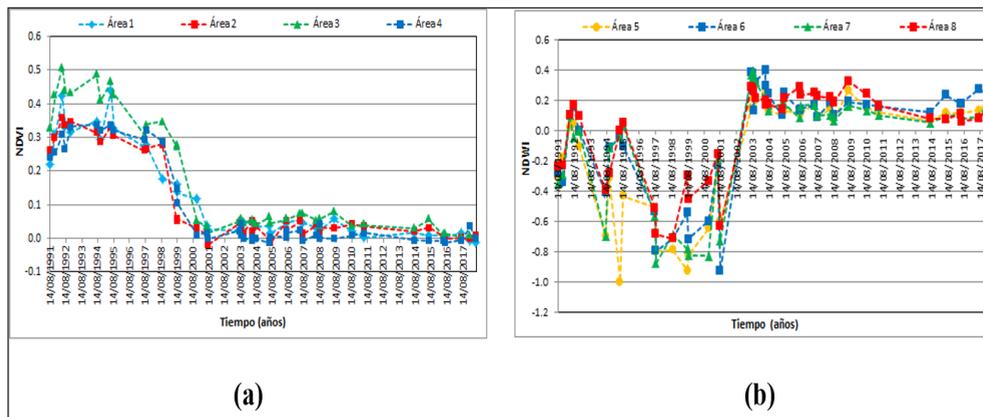


Figura 3. (a) Variación temporal del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y (b) del índice de agua de diferencia normalizado (NDWI)

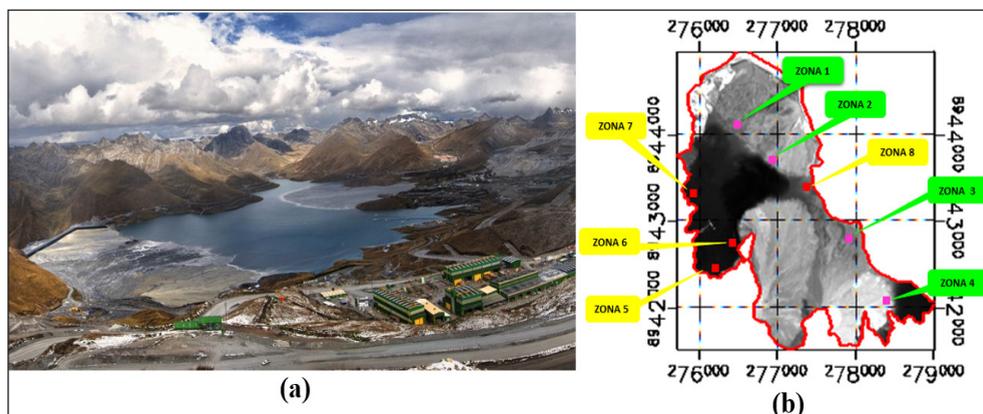


Figura 4. Presa de relave minero (a) y las zonas de interés (b)

2015, debido al relave minero. En la [Figura 5b](#) se muestra la distribución temporal del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), para un pixel de 30 m x 30 m de resolución espacial, denominadas Zona 5, Zona 6, Zona 7 y Zona 8, donde se puede visualizar una disminución de la cobertura vegetal de 0,6 a -1,0, debido al relave minero. Se observa en la gráfica Tiempo vs. NDWI una disminución de los valores de NDWI a partir del año 2016, la formación de la playa de relave afecta la variación temporal del NDWI, esta formación de playa de relave es

contrastada por Gilbert en su trabajo acerca de la importancia de la playa de relaves-Antamina ([Gilbert, 2014](#)).

Análisis espacial

Cuantificación de áreas degradadas

En la [Figura 6a](#) se realizó la representación gráfica de la variación espacial de la cobertura vegetal y del agua degradada, debido a la actividad minera y abarcando el área donde se ubica la mina de tajo abierto incluyendo los botaderos de desmonte, determinándose una tasa de crecimiento anual de 67,91 ha/

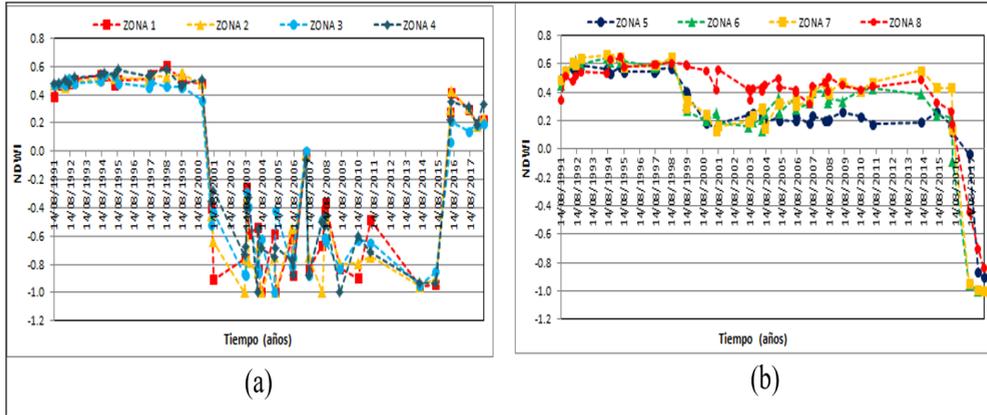


Figura 5. Variación temporal del índice del agua de diferencia normalizada (NDWI) del (a) relave minero (zona 1, zona 2, zona 3 y zona 4) y de (b) la playa de relave formado (zona 5, zona 6, zona 7 y zona 8)

año durante el periodo 2000-2018. Para el año 2018, el área y la longitud del tajo son aproximadamente de 226,9 ha y 5608,2 m respectivamente y con un diámetro de aproximadamente 1699,6 m, muy próximo a los 1700 m de diámetro proyectado para el año 2025, según el estudio realizado por Knight Piésold Consultores S.A. (Knight Piésold Consultores S.A., 1999). En la Figura 6b se realizó la representación

gráfica de la variación espacial de la presa de relave minero, determinándose una tasa de crecimiento anual de 29,142 ha/año durante el periodo 2000-2018.

En la Figura 7 se visualizan algunas imágenes de la reflectancia de superficie terrestre, para el periodo 2000-2018 obtenidos a partir de las imágenes Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI, de la mina de tajo abierto y sus botaderos de desmonte, con

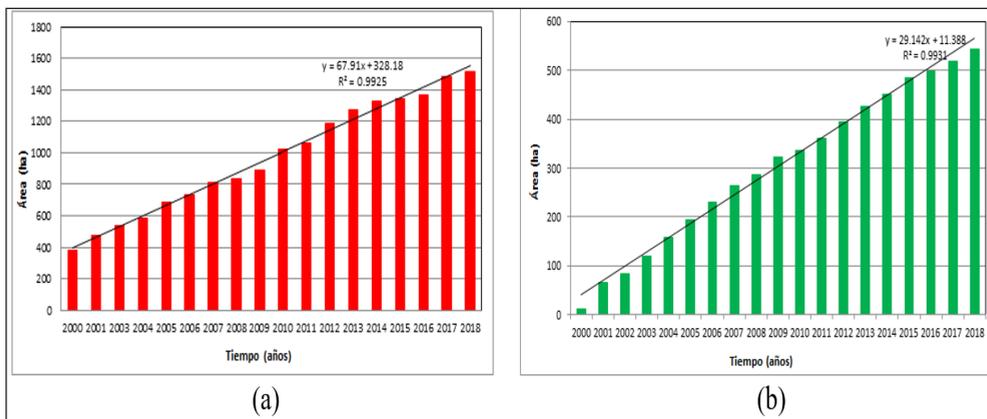


Figura 6. Cuantificación de las áreas degradadas debido a la actividad minera correspondientes a la mina de tajo abierto incluyendo los botaderos de desmonte (a) y la presa de relave minero (b).

valores máximos de 0,98 y mínimos de 0,0. Se determinó que entre los años 2000 y 2001 se inició la disminución de la cobertura del agua (laguna Antamina), la laguna Antamina tenía inicialmente un área de 32 ha, la laguna Antamina se encontraba sobre el depósito de mineral y fue drenada antes de la explotación minera, estos resultados contrastan con el estudio de impacto ambiental realizado por Knight Piésold Consultores S.A. (Knight Piésold Consultores S.A., 1999). Se observó un aumento del tamaño del tajo y de sus botaderos de desmonte hacia el sur, alcanzando un área máxima de 1516 ha. Estas imágenes tienen una resolución espacial de 30 m x 30 m.

En la Figura 8 se visualizan algunas imágenes del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) para el periodo 2000-2018, donde se determinó que el umbral superior es de 1,0 y el umbral inferior de -1,0, la Figura 8 muestra el relave almacenado con valores entre -1,0 y -0,1 y la playa de relave formado entre -0,1 y 1,0. Se determinó que entre los años 2000 y 2001, se inició el almacenamiento del relave minero y la formación de la playa de relave (áreas de color azul y verde), esta formación de la playa de relave es contrastada por Gilbert en su trabajo acerca de la importancia de la playa de relaves-Antamina (Gilbert, 2014), con un aumento de la superficie afectada hacia el sur, alcanzando una área máxima de 544 ha. Para este análisis espacial se utilizaron imágenes Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI con una resolución espacial de 30 m x 30 m y las imágenes ASTER con una resolución espacial de 15 m x 15 m.

En las Figuras 9.1 y 9.2 se realizó el trazado de vectores lineales en las imágenes del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y del índice del agua de diferencia normalizada (NDWI) (Figura 9.3 y 9.4), para obtener sus respectivos perfiles.

En la Figura 10(a), Figura 10(b) y Figura

10 (c), se obtienen los perfiles del NDVI, donde se observa que la cobertura vegetal ha disminuido debido a la actividad minera, en el año 1997 se tenía valores máximo y mínimos de 0,40 y 0,20 respectivamente mientras que para el año 2018 sus valores máximos y mínimos son de 0,071 y -0,088 respectivamente, esta disminución se observa para cada uno de los perfiles obtenidos de NDVI, esta disminución de la cobertura vegetal por la acción minera, contrasta con el estudio de impacto ambiental realizado por Knight Piésold Consultores S.A. (Knight Piésold Consultores S.A., 1999).

En la Figura 10 (d), Figura 10 (e) y Figura 10 (f), se obtienen los perfiles del NDWI, donde se observa que la cobertura del agua, representada por la laguna Antamina, ha disminuido debido a la actividad minera, en el año 1997 se tenía valores máximo y mínimos de 0,70 y -0,90 respectivamente mientras que para el año 2018 sus valores máximos y mínimos son de 0,33 y -0,08 respectivamente, los valores negativos representan la superficie de la laguna, esta disminución se observa para cada uno de los perfiles obtenidos del NDWI. En la Figura 10 (g), Figura 10 (h) y Figura 10 (i), se obtienen los perfiles del NDWI, donde se observa que la cobertura vegetal degradada por el relave minero y la playa de relave minero, ha disminuido debido a la actividad minera, en el año 1997 se tenía valores máximo y mínimos de 0,7 y 0,4 respectivamente mientras que para el año 2018 sus valores máximos y mínimos son de 0,27 y -0,99 respectivamente, los valores negativos representan la superficie del relave, esta disminución se observa para cada uno de los perfiles obtenidos del NDWI. En estas Figuras, la formación de la playa de relave afecta la variación temporal del NDWI, esta formación de playa de relave es contrastada por Gilbert en su trabajo acerca de la importancia de la playa de relaves-Antamina (Gilbert, 2014).

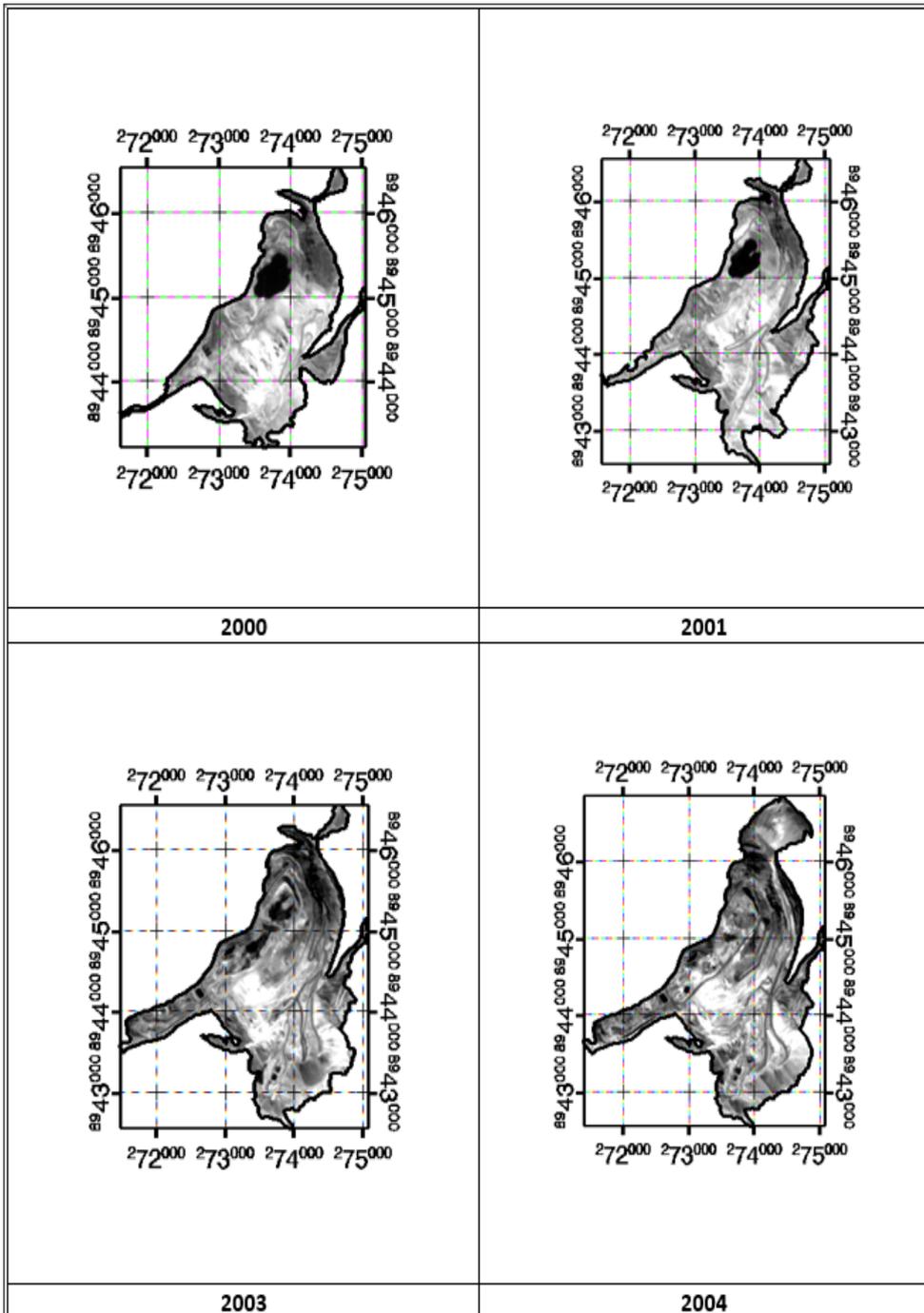
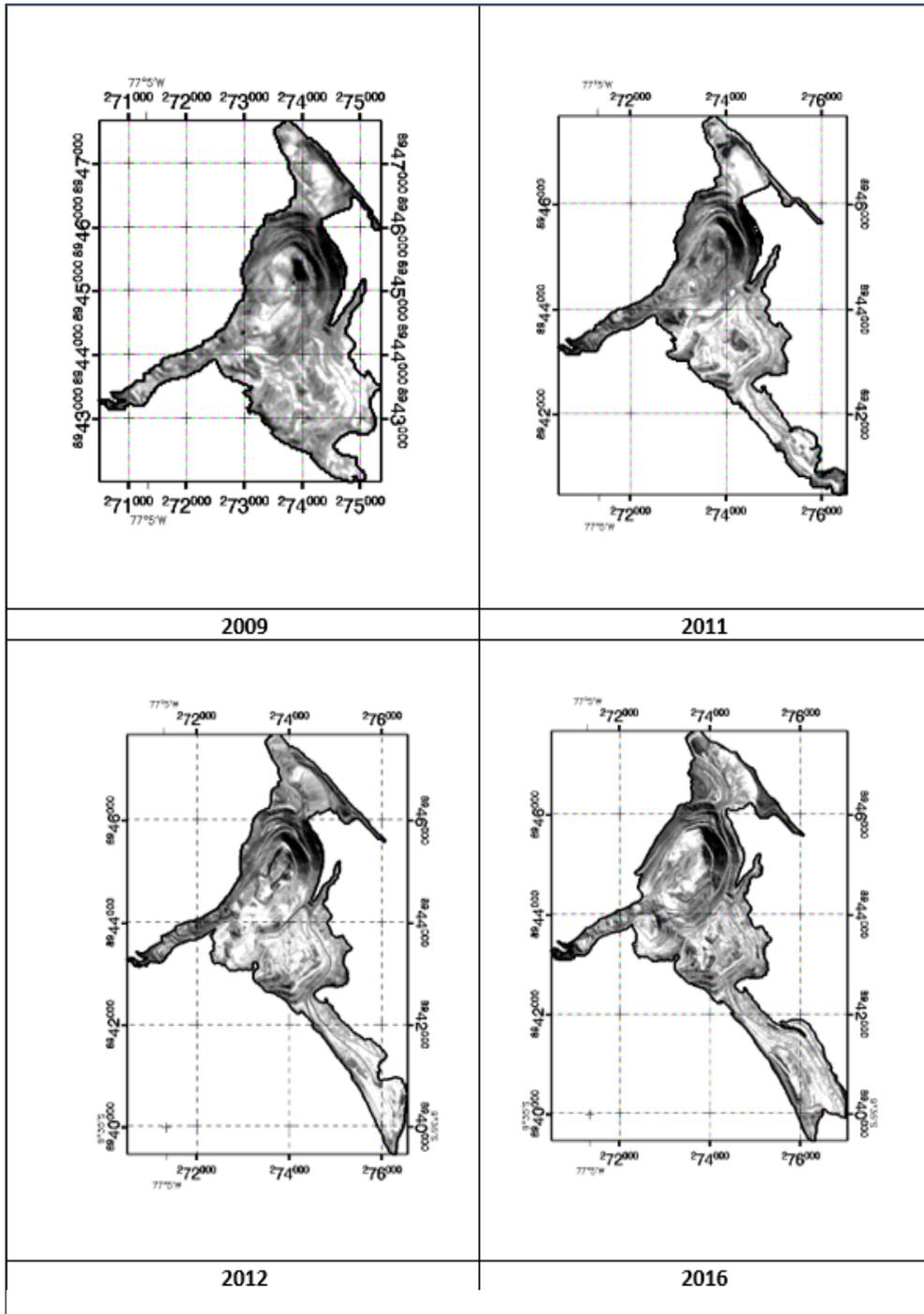
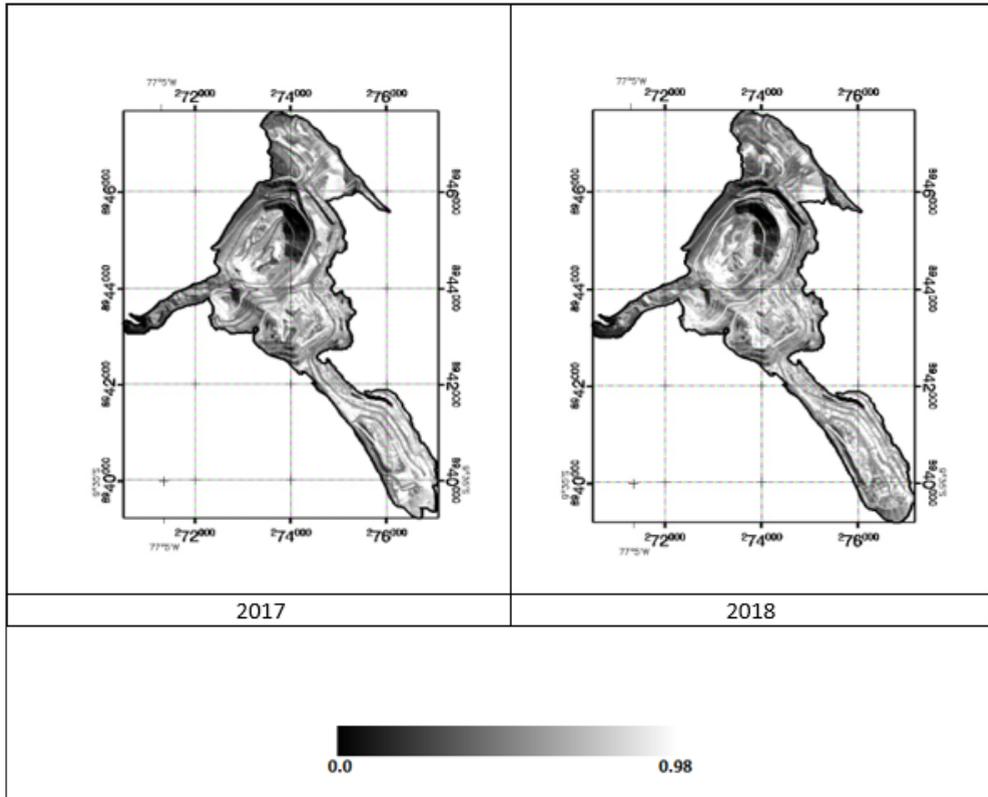


Figura 7. Reflectancia de la superficie terrestre de las imágenes Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI, a partir de los datos de radiancia espectral corregidos atmosféricamente utilizando el método FLAASH, correspondiente a la cobertura vegetal y del agua degradadas, por la actividad minera

Continuación de [Figura 7](#)



Continuación de [Figura 7](#)



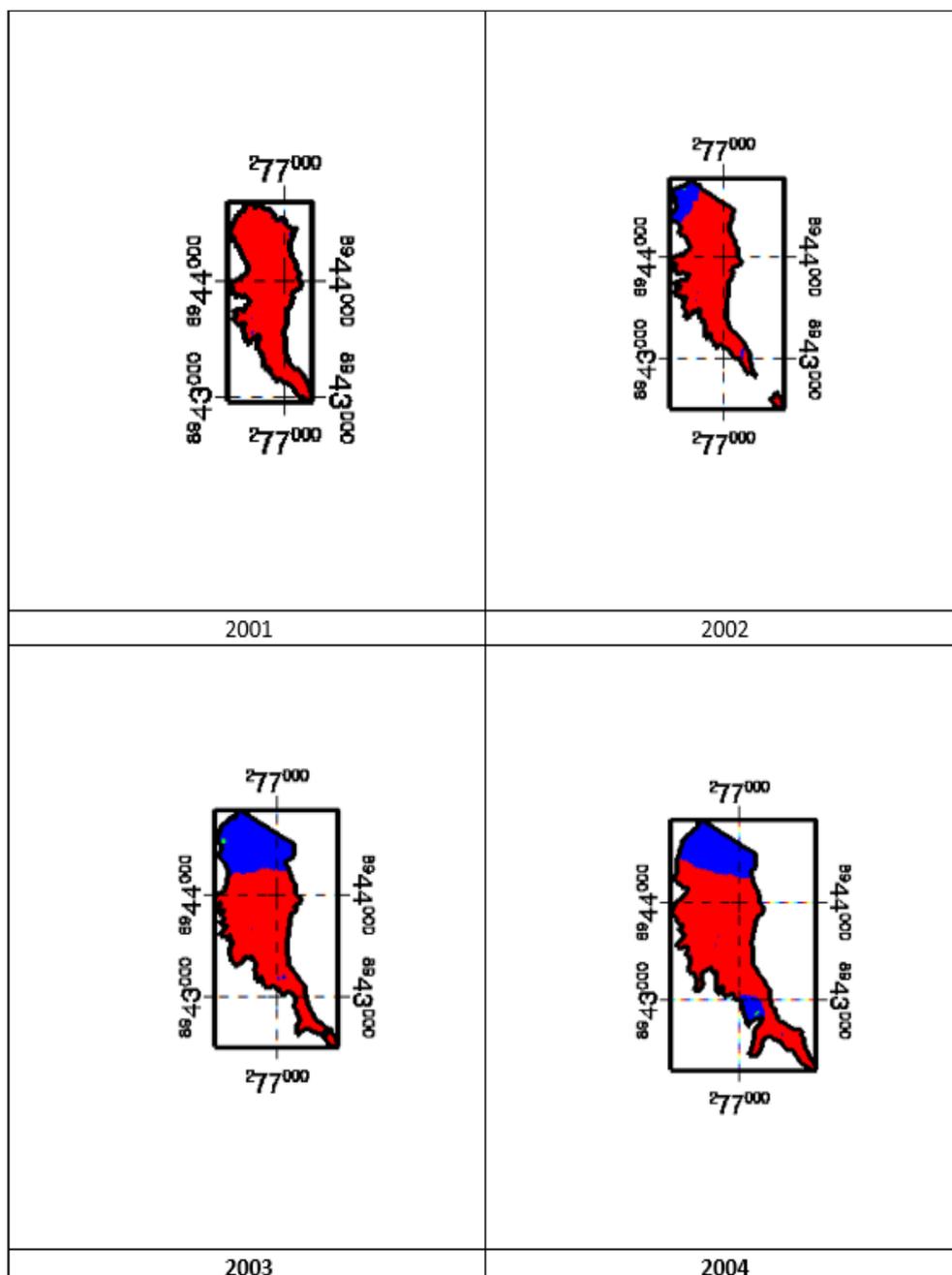
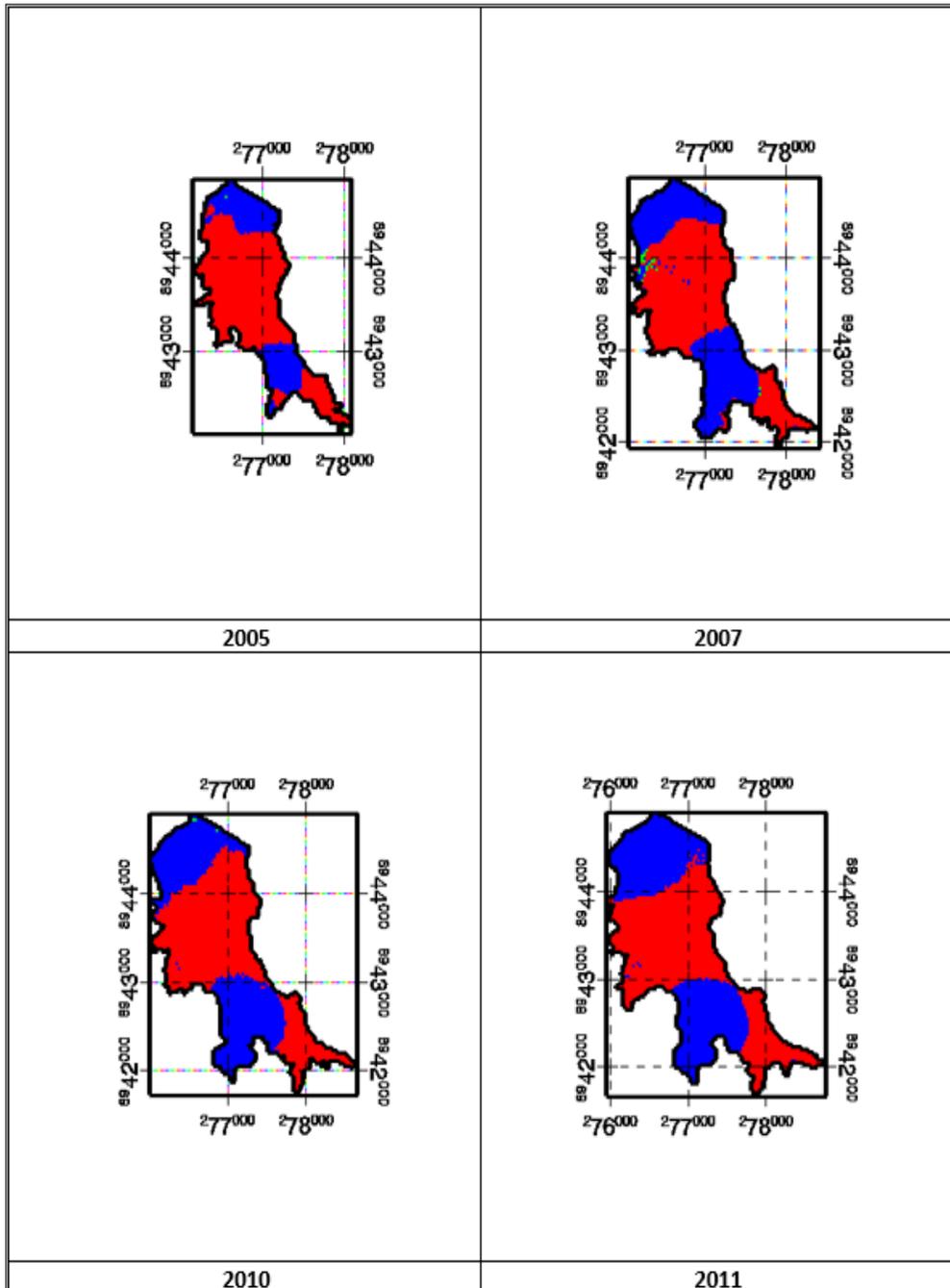
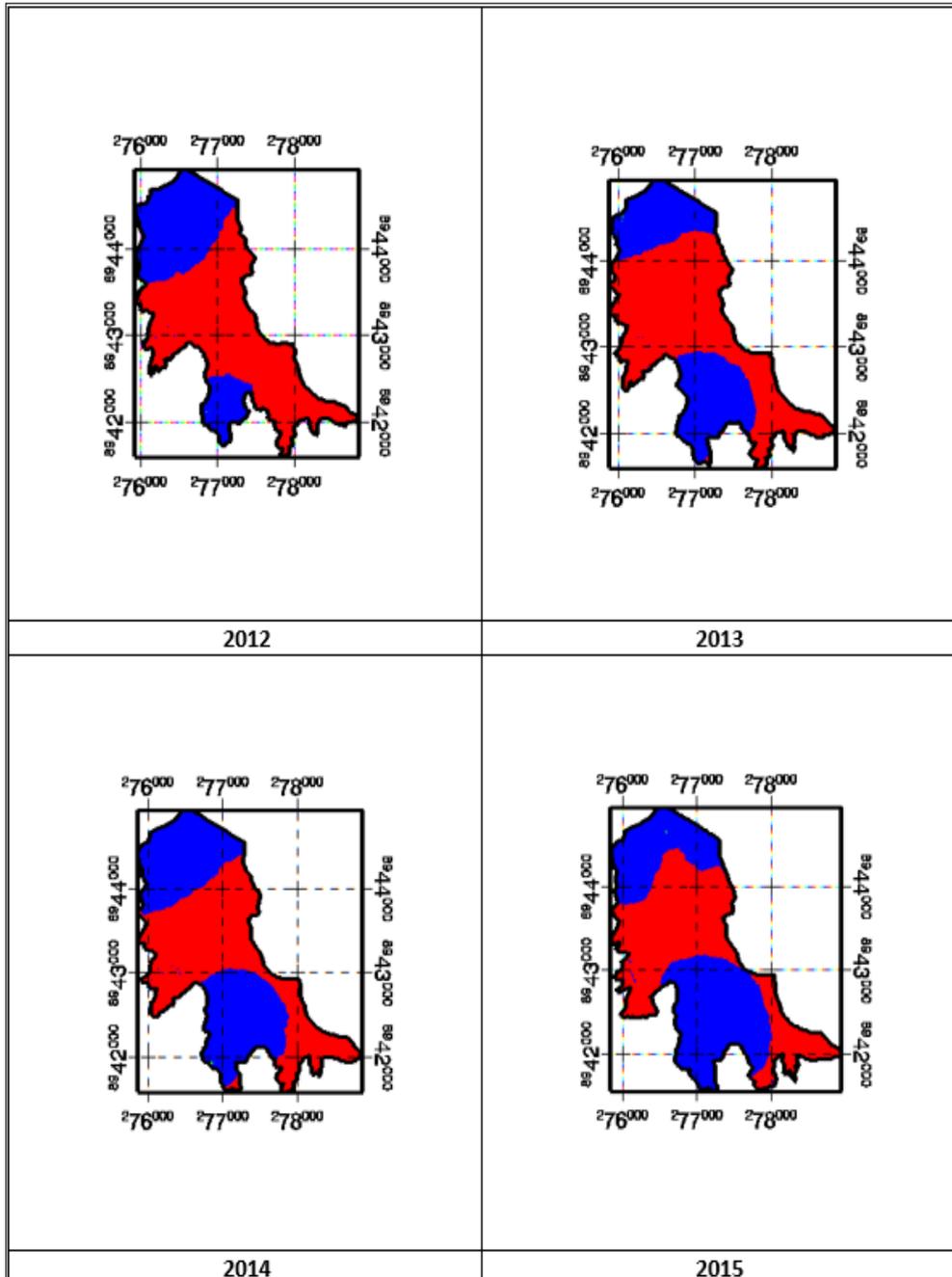


Figura 8. Variación espacial de la presa de relave minero, para el periodo de dieciocho años (2000-2018)

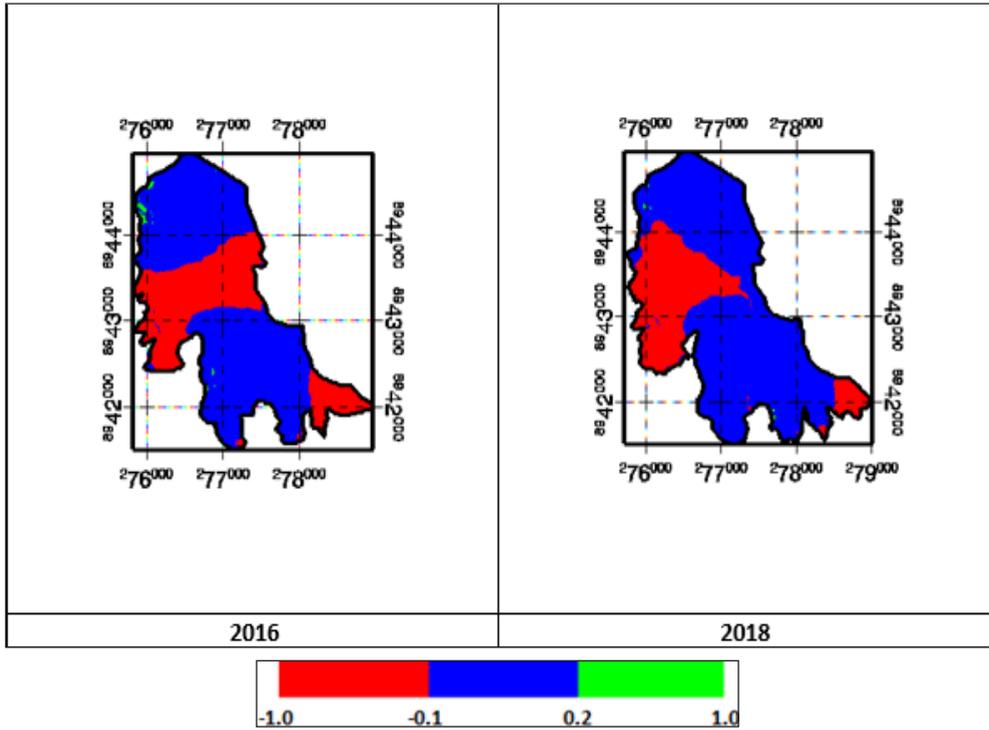
Continuación de **Figura 8**



Continuación de [Figura 8](#)



Continuación de [Figura 8](#)



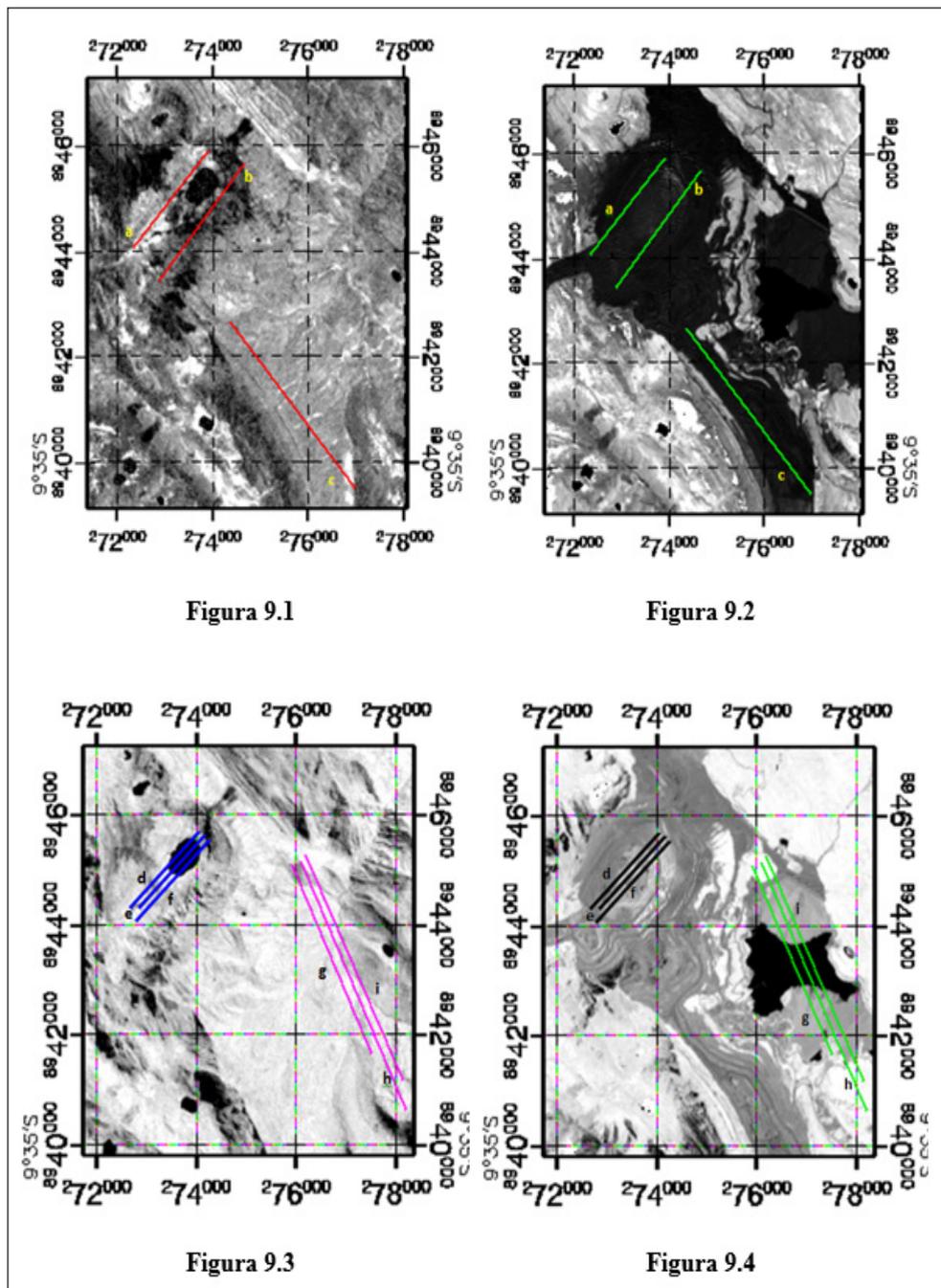
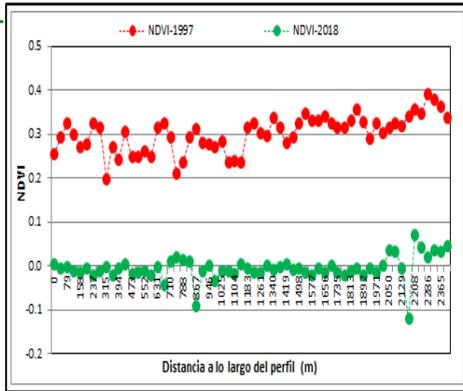
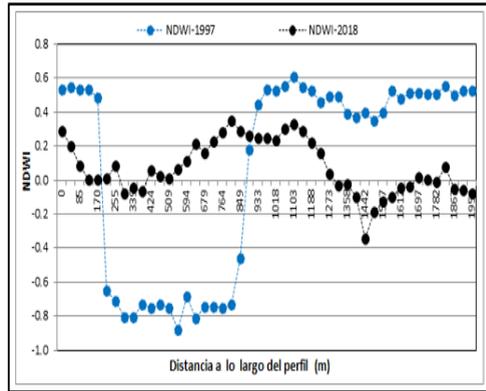


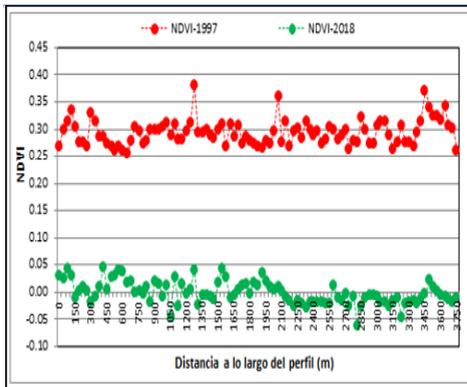
Figura 9. Trazado de vectores lineales para obtener el perfil del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Figuras 9.1 y 9.2) y del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) (Figuras 9.3 y 9.4)



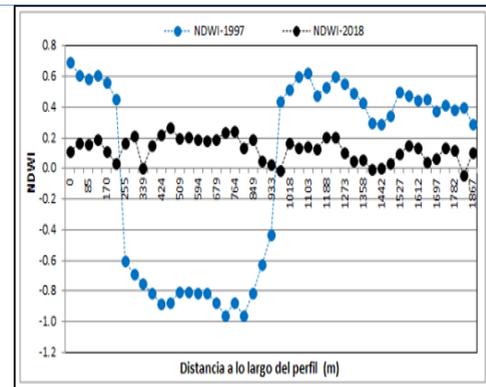
(a)



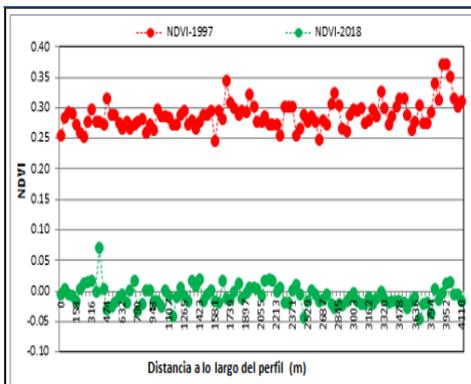
(d)



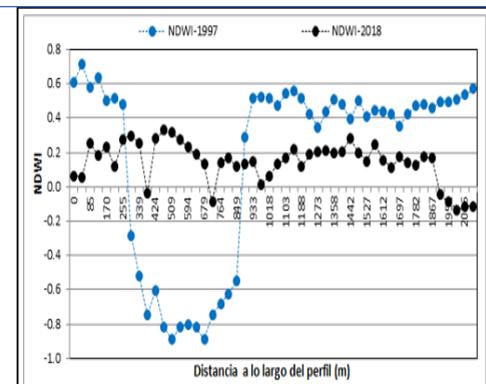
(b)



(e)



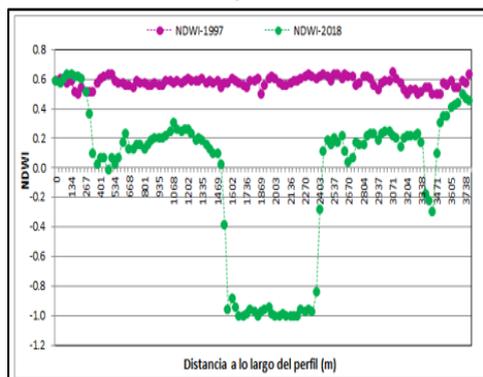
(c)



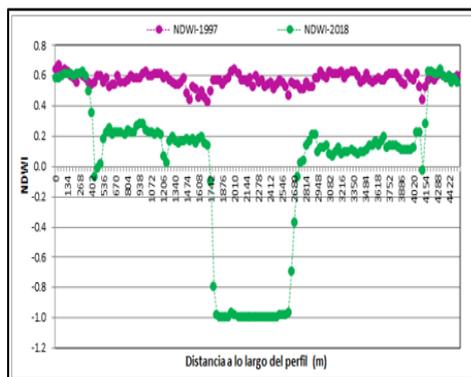
(f)

Figura 10. Obtención de los perfiles etiquetados como (a), (b) y (c) del NDVI, (d), (e) y (f) del NDWI para la laguna. Y también los perfiles obtenidos y etiquetados como (g), (h) y (i) del NDWI para el relave minero, respectivamente

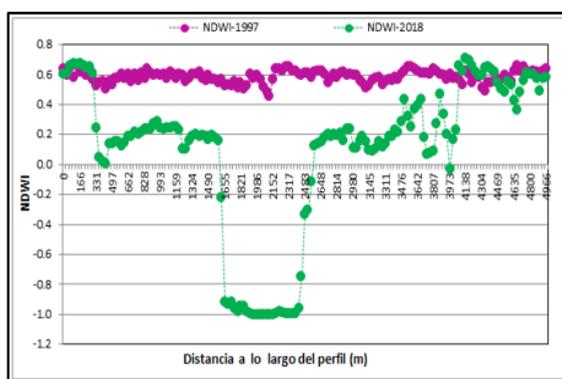
Continuación de **Figura 10**



(g)



(h)



(i)

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos cumplen con los objetivos de analizar y cuantificar la variación espacio temporal de la degradación de la cobertura vegetal y del agua, debido a la actividad minera de la mina Antamina utilizando el método de segmentación por umbrales. También se observa una fuerte disminución de la cobertura vegetal y del agua utilizando los perfiles longitudinales

La degradación de la cobertura vegetal y del agua debido a la mina de tajo abierto y al relave minero comenzó entre los años 2000 y 2001, alcanzando un área máxima de 1516 ha y 544 ha respectivamente.

Se determinó una tasa de crecimiento anual del área de la mina de tajo abierto, incluyendo los botaderos de desmonte de 67,91 ha/año, asimismo se determinó una tasa de crecimiento anual de la presa de relave minero de 29,142 ha/año durante el periodo 2000-2018.

5. Literatura citada

Aramayo, B. 2009. Análisis del conflicto socio-ambiental en Cerro de Pasco mediante la ecología política y los ciclos adaptativos. Tesis de Magister

- Scientiae, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima. Perú. 4 p.
- Gilbert, M.; Younis, M.; Garcia-haro, J. y Melia, J. 1997. Sobre la utilización de derivadas en el análisis de datos de alta resolución espectral, en Casanova, J. L. y Sanz Justo, J. (eds.), Teledetección: usos y aplicaciones. pp. 407-414.
- Gilbert, D. 2014. 31 Convención Minera. La Importancia de la Playa de Relaves -Antamina.
- Herrera, P.; Millones. O. 2011. ¿Cuál es el costo de la contaminación ambiental minera sobre los recursos hídricos en el Perú? CIES-PUCP. Lima. Perú. 7 p.
- Ingemmet [Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico]. 2009. Riesgos geológicos en la región ancash. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica; n° 38. pp:17-18.
- Knight Piésold Consultores. 1999. Addendum 3 del Estudio de impacto ambiental de la compañía minera Antamina S.A.
- Nuñez, B.; Castañeda. H. 1999. "Environmental Management in a Heterogeneous Mining Industry: The Case of Peru".
- Rojas, F. 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. Tesis de Licenciatura. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, EAP. de Física.
- Ross, M. 2001. Extractive sectors and the poor. OXFAM
- Rouse, J.; Hass, R.; Shell, J. y Deering, D. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Fraden S. C., Marcanti E. P. & Becker M. A. (eds), Third ERTS-1 Symposium, 10-14 Dec. 1973, NASA SP-351, Washington D.C. NASA, pp. 309-317.
- Sánchez, E.; Torres, C.; Palacios, C.; Aguilar, A.; Pino, S. y Granada, R. 2000. Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como indicadores para la asignación de modelos de combustible para la estimación de incendios en Andalucía. Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible. Grupo de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección de la Asociación de Geógrafos Españoles. Num.9. Madrid. Servicio de Publicaciones del Departamento de Geografía Física. Universidad de Alcalá de Henares, pp.164-174.
- Siña, H. 2008. Automatización del proceso observación de seguridad como mejora de una herramienta preventiva de accidentes. Tesis de Licenciatura, Universidad Ricardo Palma, Lima. Perú. 12p
- USGS. 2016a. Landsat Missions. Consultado el 15 de set. de 2019. Disponible de: <https://landsat.usgs.gov/>.
- USGS. 2016b. Landsat 8 (L8): Data Users Handbook. Department of the Interior U.S. Geological Survey. Version 2.0, LSDS-1574.
- Xu, H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27(14): 3025–3033. doi:10.1080/01431160600589179