


Artículo original


ÍNDICE DE VEGETACIÓN Y CAMBIO CLIMÁTICO: UNA EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DE IMÁGENES LANDSAT EN LA LAGUNA PAUCARANI EN EL PERIODO 1972 AL 2018

VEGETATION INDEX AND CLIMATE CHANGE: A MULTI-
TEMPORARY EVALUATION OF LANDSAT IMAGES IN THE
PAUCARANI LAGOON IN THE PERIOD 1972 TO 2018

ALEJANDRO JEAN PIER MAMANI VARGAS¹

 <https://orcid.org/0000-0002-1070-2861>

CARMEN ROSA ROMÁN ARCE²

 <https://orcid.org/0000-0003-1601-1794>

Recibido: 15/10/2021

Aceptado: 03/10/2021

Publicado: 19/11/2021

^{1,2}Escuela de Ingeniería Ambiental, Universidad Privada de Tacna, Perú

E-mail: ¹alejandro.jeanpiermv@gmail.com, ²carrimana@virtual.upt.pe



Resumen

La investigación evaluó la relación entre los índices de vegetación y el cambio climático haciendo una evaluación multitemporal de imágenes Landsat para el periodo 1972 – 2018 en la laguna Paucarani, Tacna. La información utilizada corresponde a imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8 nivel 1 T corregidas en nivel de reflectancia superficial seleccionadas de la plataforma Google Earth Engine en donde se generó el índice de vegetación de diferencia normalizada "NDVI" para los años 1986, 1995, 2010 y 2018 y el índice de agua de diferencia normalizada "NDWI". Los resultados indican que los valores medios de NDVI más altos corresponden a los meses de diciembre a mayo con valores iguales o mayores a 0,1, por el contrario, en los meses de julio y agosto los valores medios de NDVI disminuyen, presentando el año 1986 el valor de 0,078 y el año 2018 el valor de 0,065. De los valores de precipitación se verificó que estos presentan una frecuencia cíclica con años húmedos y secos, con respecto a la frecuencia de precipitación, se determinó que el año 1986 presenta una frecuencia de precipitación desde el mes de diciembre hasta abril en comparación con el año 2018 que presenta frecuencia para los meses enero y febrero. De los valores de promedio anual de temperatura mínima, se verificó que estos presentan una tendencia de aumento a partir del año 2012 con valores menores a $-6,50$ °C en comparación con valores de hasta $-12,4$ °C presentes en años anteriores. Se concluye que la variable precipitación, temperatura mínima y los valores del índice de vegetación "NDVI" presenta una relación con un grado de significancia $< 0,05$ según Pearson.

Palabras clave: Cambio Climático; Índices de vegetación; Imágenes Landsat.

Abstract

The research evaluated the relationship between vegetation indexes and climate change by making a multitemporal evaluation of Landsat images for the period 1972 - 2018 in the Paucarani lagoon, Tacna. The information used corresponds to satellite images Landsat 5 and Landsat 8 level 1 T corrected in level of surface reflectance selected from the Google Earth Engine platform where the normalized difference vegetation index "NDVI" was generated for the years 1986, 1995, 2010 and 2018; and also the normalized difference water index "NDWI". The results indicate that the highest mean NDVI values correspond to the months of December to May with values equal to or greater than 0.1, on the contrary, in the months of July and August the mean NDVI values decrease, presenting the year 1986 the value of 0.078 and the year 2018 the value of 0.065. From the precipitation values it was verified that these present a cyclical frequency with wet and dry years. With respect to the frequency of precipitation it was determined that the year 1986 presents frequency of precipitation from December to April compared to the year 2018 that presents frequency for the months of January and February. From the annual average minimum temperature values, it was verified that these present an increasing trend from 2012 with values lower than -6.50 °C compared to values of up to -12.4 °C present in previous years. It was concluded that the variable precipitation, minimum temperature and the values of the vegetation index "NDVI" present a relationship with a degree of significance < 0.05 according to Pearson

Keywords: Climate Change; Landsat Images; Vegetation Indices.

1. Introducción

Las imágenes satelitales son fotografías obtenidas desde el espacio, entre sus diversos usos destaca la evaluación y monitoreo del estado de la vegetación a nivel global, nacional, regional o local (Muñoz, 2010). Se sabe que los efectos del cambio climático alteran el desarrollo de los ecosistemas y sus servicios ambientales, así como a las actividades económicas y el desarrollo sostenible (IPCC, 2014; Caballero, 2005). La laguna Paucarani ubicada en el distrito de Palca, provincia de Tacna – Perú, presenta la vegetación hidro mórfica característica de la zona alto andina denominada “bofedal” (Zeballos et al., 2014). Los bofedales son valiosos sumideros de carbono, albergan una gran diversidad de especies silvestres y regulan y almacenan el recurso hídrico (Ramos, 2018; Zeballos et al., 2014). De igual manera, las lagunas son de importancia por ser fuentes de abastecimiento de agua a la población local, regulan el microclima y albergan especies endémicas, pero al igual que los bofedales sufren de una fuerte presión antrópica y son vulnerables al cambio climático (Rolando et al, 2017). El uso de las imágenes satelitales junto con la teledetección permite el monitoreo espacial y temporal de los ecosistemas y el desarrollo de índices como el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) y el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI por sus siglas en inglés) que facilita la obtención de información del estado de la vegetación y de la extensión de los cuerpos de agua (Chambe et al., 2021; Zhiminaicela et al., 2020). El uso de nuevas plataformas como Google Earth Engine permite el análisis de datos geoespaciales a escala global conectando programas satelitales para la disposición de colecciones de imágenes que incluye a los satélites Landsat, Sentinel 1, Sentinel 2, así como pronósticos climáticos, datos de cobertura terrestre, ambientales, geofísicos y socioeconómicos (Aldas, 2019; Turpo, 2018; Gorelick, 2017). En la región de Tacna, la laguna y el bofedal Paucarani representan una fuente importante de servicios ambientales a la ciudad de Tacna, de ahí su importancia para analizar el estado de su conservación y su relación con el impacto del cambio climático.

Son numerosas las investigaciones orientadas al monitoreo de ecosistemas con el uso de la teledetección, entre ellas se puede mencionar a Aldás Andrade (2019) quien analizó la variación de la cobertura vegetal en el tiempo y los cambios de uso de suelo en la reserva ecológica de Cotachi Cayapas en Ecuador, usando el índice NDVI con imágenes satelitales Landsat para los años 1986, 1995 y 2018 mediante la plataforma Google Earth Engine, donde encontraron la disminución de los valores de NDVI para el año 2017. De igual manera, Paula et al (2019) analizó temporalmente los cambios en la vegetación utilizando imágenes satelitales Landsat mediante el índice NDVI, mostrando que la vegetación densa se redujo en 8,27 % lo que indica el evidente cambio ecosistémico. Así mismo, Ramos (2018) evaluó la variación espacio temporal de los bofedales de Chalhuanca, distrito de Yaque – Caylloma, Arequipa, usando el índice NDVI para la época húmeda y seca del periodo 1986 – 2011, así como el análisis de las variables climáticas encontrando que el área de los bofedales ha aumentado en 101,25 ha para la época seca y 759,6 ha para la época húmeda, al igual que la temperatura en 1° C. Manchego (2017) evaluó la variación espacio temporal de la vegetación en la Cuenca Quilca – Chili mediante el índice NDVI haciendo uso de imágenes satelitales Landsat para el periodo 2005 – 2015 y el análisis de las variables de precipitación. Sus resultados muestran que la variable precipitación presenta mayor correlación con el valor de NDVI con un coeficiente de determinación de 0,83.

2. Objetivo

La investigación tuvo como objetivo determinar la relación que existe entre los índices de vegetación y el cambio climático, haciendo una evaluación multitemporal de imágenes Landsat durante el periodo 1972 – 2018 en la laguna Paucarani ubicada en la región Tacna.

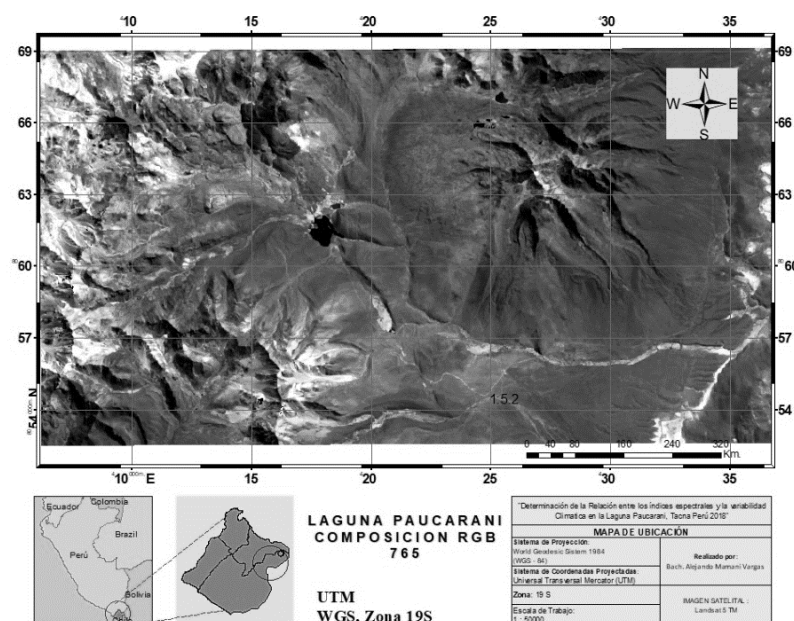
3. Metodología

Área de estudio

El estudio se realizó en la región Tacna, provincia de Tacna, distrito de Palca en la laguna Paucarani. En la figura 1, se muestra el área de estudio de la laguna Paucarani que se encuentra a 4 600 m.s.n.m. en las coordenadas $-17^{\circ}31'54,11''$ latitud sur y $-69^{\circ}46'25,62''$ latitud oeste. La estación lluviosa es entre los meses de enero a marzo con precipitaciones que van desde 0 a 300 mm.

Figura 1

Área de estudio de la Laguna Paucarani



Recolección de Datos

La información satelital fue obtenida del Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS de los satélites Landsat 5 y Landsat 8. De acuerdo con el área de estudio, se seleccionó imágenes de los años 1986, 1995, 2010 y 2018 del catálogo de datos de la plataforma Google Earth Engine de imágenes satelitales Landsat corregidas a nivel de reflectancia superficial con un porcentaje de nubosidad < al 10 %.

La información de los valores de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación fue obtenida del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI de la estación meteorológica Paucarani ubicada en las coordenadas 17°31'58,5" latitud sur y 69°46'49,4" latitud oeste.

Procesamiento de imágenes satelitales

El procesamiento de las imágenes satelitales se realizó utilizando la interfaz de aplicaciones integrado (API) del Google Earth Engine donde se elaboró scripts que permiten la generación de índices, la realización de series temporales y la descarga de las imágenes seleccionadas. Primeramente, se seleccionó la colección de datos correspondientes a Landsat 5 para los años 1986, 1995, 2010 y Landsat 8. Para el año 2018, se aplicó la selección de filtros para que se seleccione las imágenes correspondientes al área de estudio, la fecha y el porcentaje de nubosidad < al 10 %, seguidamente se aplicó la función “CFMask” que retira nubes, sombra, nieve y hielo de las imágenes landsat seleccionadas (Landsat, 2020).

El Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) es un indicador del estado de la vegetación propuesto por Rouse et al. (1993). La aplicación del NDVI implica el uso de dos bandas en una fórmula, el infrarrojo cercano (NIR) y el rojo (RED) como se muestra en la ecuación 1.

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (1)$$

El Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) elaborado por Mc Feters (1996) es utilizado para identificar la presencia de cuerpos de agua. La aplicación del NDWI implica el uso de dos bandas en una fórmula, el verde (GREEN) y el infrarrojo cercano (NIR) como se muestra en la ecuación 2.

$$NDWI = \frac{(Green-NIR)}{(Green +NIR)} \quad (2)$$

Se añadió las ecuaciones 1 y 2 para el cálculo de los índices NDVI – NDWI a los scripts elaborados.

Para el análisis de variaciones en los valores medios de NDVI se realizaron series de tiempo anuales para cada año de estudio, para esto se añadió la función “Print_Chart” que genera gráficos de valores estadísticos medios de NDVI a las imágenes seleccionadas.

Para determinar la extensión de los cuerpos de agua, se utilizó el índice NDWI para los siguientes años: 1986, 1995, 2003, 2005, 2006, 2008, 2010, 2013, 2014 y 2018. Posteriormente, se utilizó la función de descargar imagen para su procesamiento en el software Arc Map 10.5 y la determinación de la extensión en Km² mediante la herramienta “Reclassify” y la opción “Calculate Geometry” en la que se introdujo la ecuación 3 en base a los conocimientos de extensión espacial de una imagen satelital que es de 900 m².

$$\text{Área (Km}^2\text{)} = \frac{(n^\circ \text{ de pixeles})(900)}{1,000\,000} \quad (3)$$

Con los datos de precipitación y temperatura se generaron histogramas mensuales y anuales de los años analizados para determinar su variación en el tiempo. Posteriormente, se realizó una superposición de los valores mensuales de precipitación y temperatura con los valores medios mensuales de NDVI para cada año de estudio, seguidamente se aplicó la correlación de Pearson a los valores de NDVI, precipitación y temperatura para determinar si existe relación entre las variables.

Los modelos de script elaborados para la generación de índices de vegetación y las series de tiempo descritos en la presente metodología se puede acceder haciendo click a los siguientes hipervínculos:

El siguiente hipervínculo muestra el código de programación y las imágenes utilizadas para la elaboración del índice NDVI para una imagen satelital Landsat 7:

<https://code.earthengine.google.com/d489e7018da4f95e39c248837e5df>

El siguiente hipervínculo muestra el código de programación las imágenes utilizadas para la elaboración del índice NDVI para una imagen Landsat 8:

<https://code.earthengine.google.com/fe5a095b8e0191236bce268970419d15?noload=true>

El siguiente hipervínculo muestra el código de programación las imágenes utilizadas para la elaboración del índice NDWI para una imagen Landsat 7:

<https://code.earthengine.google.com/3e6bb20480ff75bf4cc62d4a20c42658?noload=true>

El siguiente hipervínculo muestra el código de programación las imágenes utilizadas para la elaboración del índice NDWI para una imagen Landsat 8:

<https://code.earthengine.google.com/e1aef5f5a70a69f7b1124294b78573e5?noload=true>

Todos los scripts fueron elaborados de la plataforma Google Earth Engine.

4. Resultados

La figura 2 muestra las series de tiempo, se puede observar la reducción de los valores medios de NDVI para los meses de julio y agosto en los años analizados, presentando el año 1986 el valor de 0,079 y el año 2018 el valor de 0,065.

Los acumulados anuales de precipitación en el periodo 1986 a 2018 son cíclicos con años húmedos y secos, sin embargo, en la figura 3, se observa que los acumulados mensuales de precipitación presentaron una disminución en su frecuencia y una mayor intensidad solo para los meses de enero y febrero en el año 2018 en comparación con el año 1986.

Figura 2

Variación de los valores medios de NDVI para los años 1986, 1995, 2010 y 2018

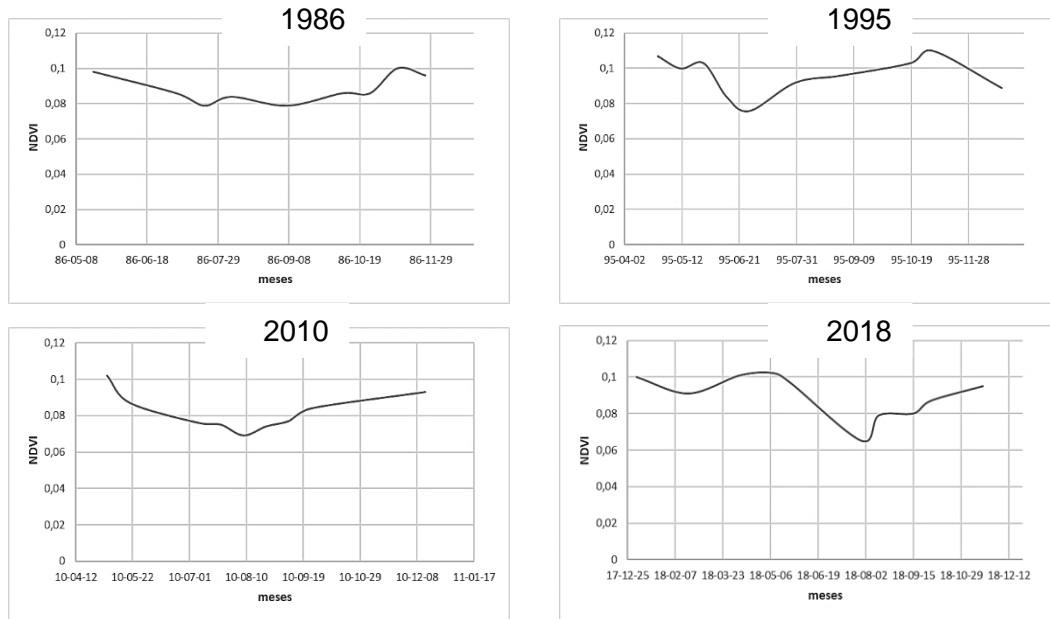
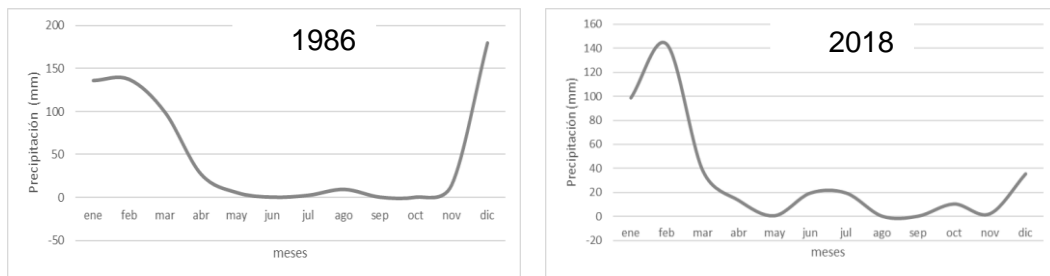


Figura 3

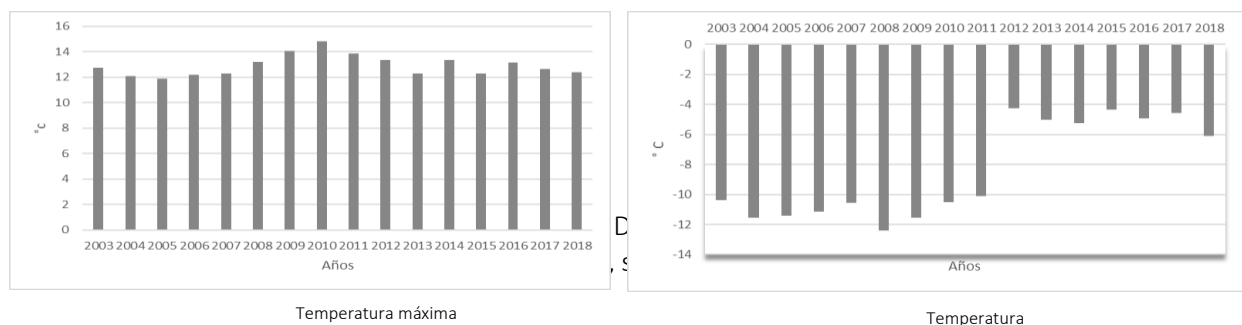
Acumulados mensuales de precipitación del año 1986 y 2018



En la figura 4, la temperatura mínima media anual presenta una tendencia de aumento a partir del año 2012 con valores menores a $-6,50\text{ }^{\circ}\text{C}$ en comparación con años anteriores al 2012 donde se presentaba valores de hasta $-12,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ con respecto a la temperatura máxima media anual no se observa aumentos salvo en el año 2010.

Figura 4

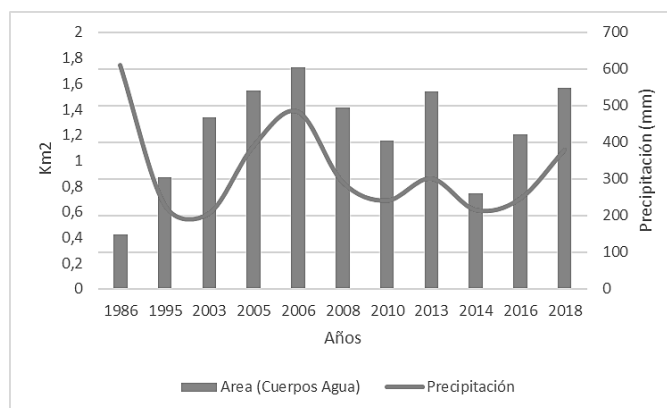
Promedios anuales de temperatura máxima y mínima



precipitación es de 215,9 mm y la extensión del área de cuerpo de agua es la menor en toda la serie histórica.

Figura 5

Relación acumulada anual de precipitación con área de cuerpos de agua



Trabajando la correlación de Pearson, en la tabla 1, se observa que existe una relación directa entre valores de vegetación, precipitación y temperatura mínima encontrando una correlación alta y una significancia de ($p < 0,05$) rechazando la hipótesis nula.

Tabla 1

Correlación de NDVI, precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima

Correlación	NDVI	Precipitación	T° max	T° min
Correlación de Pearson	1	0,550	0,072	0,709*
Sig. (bilateral)		0,125	0,855	0,032
N	9	9	9	9
Correlación de Pearson	0,550	1	0,467	0,809**
Sig. (bilateral)	0,125		0,205	0,008
N	9	9	9	9
Correlación de Pearson	0,072	0,467	1	0,617
Sig. (bilateral)	0,855	0,205		0,077
N	9	9	9	9
Correlación de Pearson	0,709*	0,809**	0,617	1
Sig. (bilateral)	0,032	0,008	0,077	
N	9	9	9	9

Nota. *, ** La correlación es significativa en el nivel 0,05 y 0,01 (bilateral).

5. Discusión

En este estudio se evidenció una disminución de los valores de NDVI en los meses de julio y agosto desde el año 1986 al año 2018. Esto es una disminución del vigor de la vegetación de la laguna Paucarani, así como la variación de los cuerpos de agua de acuerdo con los acumulados anuales de precipitación siendo esto contrario al estudio de Manchego (2017), quien determinó un aumento en los valores medios de NDVI para un periodo de 10 años desde el año 2005 al 2015 centrándose en la cuenca Quilca – Chili, Arequipa los resultados de Manchego serían contrarios a los nuestros debido a la temporalidad y área espacial de su investigación. Con respecto a la relación de la variable precipitación y los valores de NDVI, la investigación de Manchego (2017) encuentra que existe una correlación de ambas variables, lo que concuerda con la presente investigación de que a mayores acumulados anuales de precipitación los valores de NDVI aumentan. Por su parte, Aldas (2019), en su investigación, encuentra que los valores de NDVI para un periodo de análisis de 32 años tienden a disminuir en el tiempo, lo que concuerda con la presente investigación. Esto sería atribuible a relaciones causales de cambio climático y actividades antrópicas.

De acuerdo con los resultados de análisis temperatura y precipitación, Ramos (2018), encuentra una disminución en los ciclos pluviales de precipitación para años más recientes y evidencia un aumento de la temperatura mínima hacia el final del periodo evaluado y Ríos (2018) quien evaluó estaciones meteorológicas de una región encuentra que el 80 % de las estaciones meteorológicas presentan un incremento en su temperatura promedio. Estas investigaciones son concordantes con los resultados presentados en la presente investigación, lo que sería atribuible a factores causantes del cambio climático. De acuerdo con la relación de los cuerpos de agua y los acumulados anuales de precipitación, en la investigación de Ríos (2018) se encuentra la variación de los cuerpos de agua de acuerdo con los acumulados anuales de precipitación, lo que es concordante con la presente investigación, debido a que la extensión de los cuerpos de agua está relacionada con los acumulados de precipitación.

6. Conclusiones

Se evidenció que los valores de NDVI, precipitación y temperatura mínima presentan una correlación alta ($< 0,05$) según Pearson, lo que evidencia que las variables climáticas influyen en la vegetación y cuerpos de agua de la laguna Paucarani.

De los años analizados, se evidenció una disminución de los valores medios de NDVI para los meses de julio y agosto presentando el año 1986 el valor de 0,079 y el año 2018 el valor de 0,065 mostrando la disminución del vigor de la vegetación para un periodo de 32 años.

El ciclo pluvial mostró que el año 1986 las frecuencias de precipitación son más extensas desde diciembre a marzo en comparación con el año 2018 que presentó mayor intensidad pluvial solo los meses de enero y febrero. Los promedios anuales de temperatura mínima mostraron una tendencia de aumento a partir del año 2012 con valores menores a $-6,50$ °C en comparación con la década anterior. La extensión de las áreas de cuerpos de agua de la laguna Paucarani mostró una relación directa con los acumulados anuales de precipitación

7. Referencias Bibliográficas

Aldás Andrade, A. P. (2019). *Análisis De La Dinámica Temporal Del Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada (Ndví) Para Los Años 1986, 2001 Y 2017 En La Reserva Ecológica Cotacachi Cayapas, Imbabura, Mediante El Uso De Google Earth Engine*. 166. [Tesis de Pregrado, Pontificia

- Universidad Católica de Ecuador] Repositorio Institucional – Pontificia Universidad Católica de Ecuador.
- Caballero, M., Lozano, S., Ortega, B. (2005). Efecto invernadero, Calentamiento Global y Cambio Climático: Una Perspectiva desde las Ciencias de la Tierra. *Revista Digital Universitaria*, 8(10). <http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/int78.htm>
- Chambe, J., Quintana, D., Sanga, M. (2021) Análisis Multitemporal de la laguna Suches y del vigor de la vegetación del bofedal de Huaytire, Tacna. *Ciencia y Desarrollo*, 20(1). DOI:<https://doi.org/10.33326/26176033.2021.1.1106>
- Díaz González, F., Quintero Torres, S., Triana Correa, J., y Morón Hernández, D. (2014). *Aproximación a los sistemas de percepción remota en satélites pequeños*. Universidad Sergio Arboleda.
- Gilabert, M. A., Gonzáles-Piqueras, J., y García-Haro, J. (1997). *Acerca de los índices de vegetación*. Revista de Teledetección.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de Síntesis*. In Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Manchego, M. G. (2017). *Variabilidad Espacio Temporal de la Vegetación en la Cuenca Quilca - Chili durante el periodo 2005 - 2015*. [Trabajo de grado, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional de San Agustín.
- Muñoz, P. (2013). *Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación*. Centro de Información de Recursos Naturales. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/26389>
- Paula, P. A., Zambrano, L., y Paula, P. (2018). Análisis Multitemporal de los cambios de la vegetación, en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo como consecuencia del cambio climático. *Enfoque UTE*, 9(2), 125–137.
- Ramos, C. S. (2018). *Variación espacio - temporal de los ecosistemas de humedales altoandinos en el anexo de chahuanca del Distrito de Yanque (Caylloma, Arequipa) entre los años 1986 - 2016* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín]. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Reuter, F. (2009). *Principios de teledetección. Serie Didáctica No 33. Catedra de Teldetección y Cartografía*. Facultad de Ciencias Forestales – Universidad Nacional Santiago de Estero. <http://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-33-Principios-teledeteccion-REUTER.pdf>
- Rios, D. (2018). *Monitoreo del efecto del cambio climático en la huastequa potosina a partir de técnicas de percepción remota y estaciones climatológicas* [Tesis de pregrado, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica]. Repositorio del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica]
- Rolando, J. L., Turin, C., Ramírez, D. A., Mares, V., Monerris, J., y Quiroz, R. (2017). Key ecosystem services and ecological intensification of agriculture in the tropical high Andean Punaas affected by land-use and climate changes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 236, 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.010>
- Rouse, J.W., Hass, R.W., Schell, J.A., y Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation system in the great plains whit ERTS, *3rd ERST Symposium, NASA*, 1, 309 – 317.
- Schomwandt, D. (2015). *Teledetección aplicada a las ciencias agronómicas y recursos naturales*.
- Silva, C., y Rivera, M. (2016). *Diagnostico multitemporal y generación de un plan de acción, adaptación y mitigación para las zonas de desertificación y degradación del Cerro Nitón, Parroquia Chiquicha Cantón Pelileo* [Tesis de Pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/6224/1/236T0233.PDF>
- Turpo Cayo, E. (2018). *Modelagem de mudancas espaco-temporais de ambientes glaciais dos andes do*

sul-PERU [Tesis de Postgrado, Universidade Estadual de Feira de Santana]. Repositorio de Universidade Estadual de Feira de Santana-

U.S. Geological Survey. (2016). *Landsat - Earth Observation Satellites*. En Landsat Missions Timeline. <https://doi.org/10.1177/0033688205055578>

Zeballos, G., Soruco, Á., Cusicanqui, D., Joffré, R., y Rabatel, A. (2014). Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña en Bolivia. *Ecología En Bolivia*, 49(3), 14–26.

Zhiminaicela Cabrera, J., Quevedo-Guerrero, J., y Morocho-Castillo, A. (2020). Deforestación y cambios en la cobertura vegetal del archipiélago de Jambelí, mediante el uso de imágenes satelitales *Landsat 8. Manglat*, 17(3), 282. <https://doi.org/10.2307/40087073>.