

## Google Earth Engine como herramienta de detección de cambios espaciales e multitemporales: Caso glaciar Quelccaya, Perú

Efrain Yury Turpo Cayo<sup>1</sup>  
Joselisa Maria Chaves<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Feira de Santana-UEFS, Estudante do Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Campus Universitário, CEP 44036-900, Feira de Santana- Brasil  
efra\_abdias@hotmail.com

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Feira de Santana-UEFS, Departamento de Ciências Exatas, Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Avenida Transnordestina, s/n, km 3, Bairro Novo Horizonte, Feira de Santana- Brasil, CEP 44054-008.  
joselisa@uefs.br

**Abstract.** Tropical glaciers are reserves and sources of fresh water, they are excellent indicators of the climate and are in a process of glacial retreat in its superficial extension, for that reason the importance of the study of environments with glacier to mitigate its effects, This present study was realized the Spatial and multi temporal analysis in a period of 41 years from 1975 to 2016, in the most important glacier of the tropics Glacier "Quelccaya", located in the Andes of southern Peru. With the Landsat digital satellite imaging cloud support in the Google Earth Engine (GEE) platform, it was made including coverage's adjacent to the Glacier, such as wetlands and lagoons. To obtain maps were used indices, NDSI (Normalized Difference Snow Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and NDWI (Normalized Difference Water index) for the detection of Glaciers, wetlands and lagoons respectively, added the slope map for to differentiate cloud gaps, which were integrated and related. The results show an evident glacial loss, in the last 41 years, the glacier has lost more than 40% of its surface, which has an effect and spatial relation with the increase of the surface extensions of the wetlands and lagoons. This study shows the spatial and temporal relationships between the threes coverage's, Highlighting the use of GEE as an image processing tool in a short time.

**Palavras-chave:** Quelccaya Ice Cap, Landsat, image processing, NDVI, NSDI, NDWI, Capa de hielo Quelccaya, Landsat, processamento de imagens, NDVI, NSDI, NDWI, DEM SRTM.

### 1. Introducción

Google Earth Engine (GEE) es una plataforma de escala planetaria para el análisis de datos medioambientales. Reúne más de 40 años de imágenes de satélite de todo el mundo actuales e históricas, y ofrece las herramientas y la potencia computacional necesarias para analizar y extraer información de este enorme almacén de datos. Entre una de sus aplicaciones es detección de cambios de la cubierta terrestre (Google, 2016). GEE es una tecnología paralela masiva para el procesamiento de alto rendimiento de los datos geoespaciales, y alberga una copia de todo el catálogo de imágenes Landsat y otras imágenes (Venturino et al., 2014). En este estudio se utiliza GEE como una alternativa a los procesamientos digitales de imágenes (PDI) de manera tradicional con software comercial o libre, específicamente caso la detección de cambios espaciales y multitemporales de glaciares y su entorno ambiental, como bofedales y lagunas.

Los glaciares tropicales están en un proceso de retroceso en su extensión superficial, trayendo efectos adversos sobre el ambiente en su entorno, siendo posible detectar sus cambios espaciales con la utilización de imágenes de satélite (Ribeiro et al., 2010; Vuille et al., 2008; Silverio e Jaquet, 2005; Mark e Seltzer, 2005). En las zonas de alta montaña del Perú, principalmente donde se encuentra las cordilleras nevadas, se albergan una gran cantidad de lagunas, que son de gran aporte hídrico y de importancia económica en el país

(Chávez et al., 2011). En muchas regiones montañosas, el retroceso glaciar ha estado acompañada por el desarrollo de lagos pro glaciales, lo que puede suponer un peligro de inundaciones (Cook et al., 2016). Los bofedales almacenan aguas provenientes de precipitaciones pluviales, deshielo de glaciares y principalmente afloramientos superficiales de aguas subterráneas (Castro et al., 2014; Garcia e Willems, 2015). Los que involucra la necesidad de estudiar no solo la evolución del glaciar, sino también los bofedales y lagunas adyacentes, la cual es planteada en este trabajo con el soporte de GEE.

Glaciar Quelccaya es la mayor capa de hielo tropical de la Tierra, se encuentra en el rango de límite oriental del altiplano peruano en la Cordillera Oriental (Thompson et al., 1985).

El retiro del glaciar más grande de la salida del Glaciar Quelccaya, Qori Kalis (QK), ha sido bien documentado desde 1963 el uso de técnicas fotogramétricas de áreas y terrestres, QK ha experimentado un incremento de 10 veces en su ritmo de retroceso entre 1991 y 2005 (~ 60 m / año) en relación con el período de medición inicial 1963-1978 (~ 6 m/año) (Brecher e Thompson, 1993; Thompson et al., 2000 e 2006). Reciente retiro de la capa de hielo muestra la situación de hace 5000 años atrás del glaciar Quelccaya donde existió un cambio climático regional (Buffen et al., 2009).

Para el cálculo de extensiones superficiales de Glaciares, bofedales y lagunas es posible realizar con la utilización de índices normalizados NDSI (Normalized Difference Water Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y NDWI (Normalized difference water index) respectivamente, experimentados por Macander et al., (2015), Garcia e Willems, (2015) e Chávez et al., (2011), los índices mencionados ya existen procesadas en GEE, posibilitando mejorar su resultados añadiendo más variables para la identificación de la unidades estudiadas.

Este estudio tienes como objetivos utilizar el GEE como herramienta PDI para la detección multitemporal de glaciares, bofedales, lagunas en un periodo de 41 años de 1975 al 2016, siendo posible realizar múltiples proceso en un tiempo corto con GEE utilizando imágenes de satélite Landsat. Esperando que exista alguna relación temporal e espacial entre las tres variables estudiadas. El Glaciar Quelccaya se encuentra localizado en la cordillera oriental de los andes del sur de Perú se aprecia en la **Figura 1**, límite entre la región Puno y Cusco.

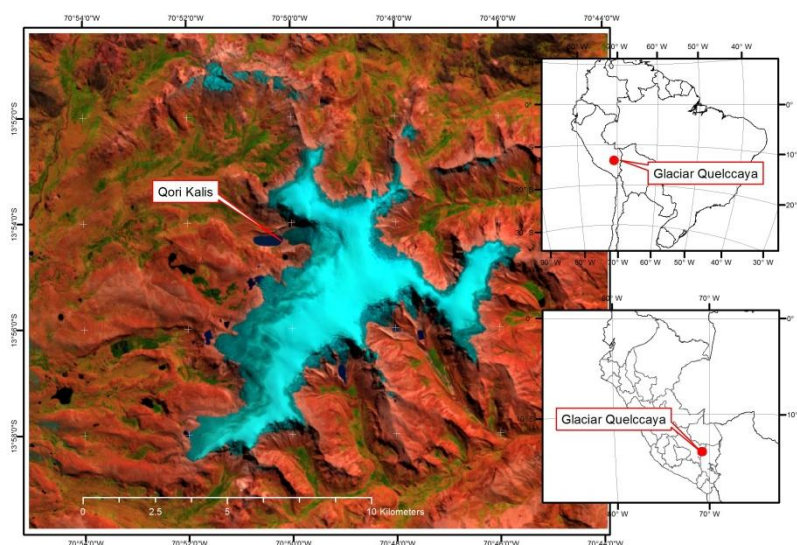


Figura 1. Mapa de localización del Glaciar Quelccaya, imagen Landsat 8 OLI falso color RGB 654 año 2016. Fuente: elaboración propia en base a cartografía base Perú e imagen satelital Landsat.

## 2. Metodología de Trabajo

Para el análisis se utilizó imágenes de satélite Landsat 1(MSS), Landsat 2 (MSS), Landsat 5 (TM), Landsat 8 (OLI) y DEM SRTM 1 arc-second (30m), de las cuales a la fecha de estudio la mayoría están disponibles en GEE, visualizar Tabla 1, todas las imágenes en el GEE son TOA (Top of Atmosphere Reflectance), el resto de las imágenes también se convirtió a TOA para ser cargadas en GEE con la herramienta Assets “image upload” y procesados sus índices en base a las ecuaciones 1, 2 y 3.

**Tabla 1.** Fechas de imagen, satélite, sensor y disponibilidad en la zona de estudio.

N°	Fecha de Imagen	Satélite	Sensor	Disponibilidad
1	29/07/1975	Landsat 1	MSS	USGS Earth Explorer
2	02/06/1979	Landsat 2	MSS	USGS Earth Explorer
3	20/07/1985	Landsat 5	TM	google earth engine
4	02/06/1990	Landsat 5	L5	google earth engine
5	02/06/1995	Landsat 5	L5	google earth engine
6	09/06/2000	Landsat 5	L5	google earth engine
7	26/06/2005	Landsat 5	L5	google earth engine
8	10/06/2010	Landsat 5	L5	google earth engine
9	23/06/2014	Landsat 8	OLI	USGS Earth Explorer
10	12/06/2016	Landsat 8	OLI	USGS Earth Explorer

Fuente: elaboración propia en base a GEE y USGS

$$NDVI = \frac{(IRC - R)}{(IRC + R)} \quad (1), \quad NDSI = \frac{(V - SWIR)}{(V + SWIR)} \quad (2), \quad NDWI = \frac{(V - IRC)}{(V + IRC)} \quad (3)$$

Dónde IRC es la reflectividad en el Infrarojo cercano, R es la reflectividad en el rojo, V es la reflectividad en el verde, SWIR es la reflectividad en el Infrarojo de onda corta.

Los Bofedales fueron identificadas en GEE reclasificando el NDVI, en base al estudios de bofedales en cabecera de cuenda en el Perú por (Garcia e Willems, 2015), donde indica que  $NDVI > 0.43$  son bofedales, la cual se utilizó para sensores TM y OLI. Mientras tanto para el caso de los sensor MSS se reclasifico  $NDVI > 0.25$ , revisar Figura 1.

Los Glaciares fueron identificadas con GEE, reclasificando el NDSI, considerando el criterio de (MACANDER et al., 2015) donde considera que  $NDSI > 0.4$  es glaciar esto en los sensores TM y OLI. En caso del sensor MSS por la ausencia de la banda del infrarrojo de onda corta, se calculó el área glaciar utilizando una clasificación supervisada en el mismo GEE, revisar Figura 1.

Las Lagunas fueron identificadas con GEE, reclasificando el NDWI y utilizando un condicional, donde se tomó en cuenta varios criterios, entendiendo que  $NDWI > 0.2$  para los sensores TM y OLI y Sensor MSS  $NDWI > 0.1$  se consideró agua. para la eliminar la confusión de las sombras con cuerpos de agua (Macander et al., 2015), utilizo la una ecuación de modelo de sombra en base al ángulo de incidencia solar la cual requiere muchos parámetros por imagen, para simplificar ese proceso en este trabajo se utilizó el mapa de pendientes en base al modelos de elevación digital SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de 30m. de resolución espacial, disponible en GEE. Entendiendo que los cuerpos de agua, específicamente las lagunas tienen pendientes planas, por la precisión del DEM SRTM y cuerpos de agua pequeño se consideró que áreas con pendientes mayores a  $10^\circ$  no se

consideran cuerpos de agua (revisar Figura 2), de esta manera se elimina la confusión con las sombras.

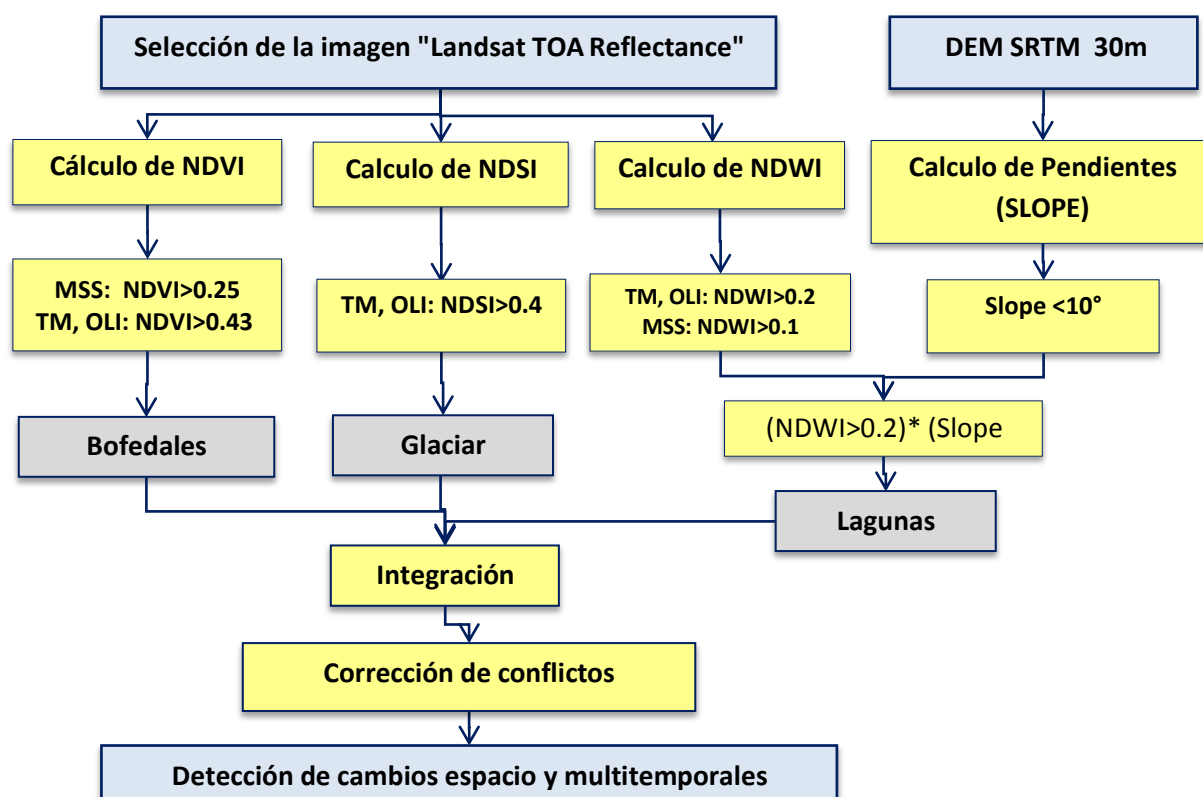


Figura 2. Esquema metodológico de procesamiento.

Los tres capas se exporto en archivo TIF para ser convertidos a elementos vectoriales en un programa SIG, integrados las tres capas se realizaron una corrección semiautomática de los conflictos en su mayor parte entre unidades glaciar y lagunas, se calculó las áreas por años para detección de cambios espaciales y multitemporales de las tres coberturas.

### 3. Resultados e Discusiones

A partir del procesamiento digital de imágenes en ambiente GEE se puede destacar la rapidez de procesamiento en el tiempo de imágenes multitemporales de distintos sensores a diferencias de procesamientos tradicionales. Los resultados mostrados en la Tabla 2 y Figura 4, muestran que los Glaciares, Bofedales y Lagunas tienen una relación en su extensión superficial, a la pérdida de glaciares los bofedales y lagunas aumentan su extensión superficial en el Ambiente del glaciar Quelccaya.

**Tabla 2.** Extensiones superficiales por años por coberturas

Año	Extensión Superficial (km <sup>2</sup> )		
	GLACIAR	BOFEDAL	LAGUNAS
1975	75.54	22.37	0.40
1979	69.81	12.24	0.74
1985	72.75	17.56	0.43
1990	60.42	29.73	0.40
1995	69.05	46.37	0.66



2000	54.93	33.53	0.84
2005	48.53	22.54	1.09
2010	44.97	37.42	1.23
2014	49.22	52.01	1.30
2016	42.36	47.54	1.38
Total	587.58	321.32	8.48

Fuente: Elaboración propia en base al procesamiento de imágenes Landsat

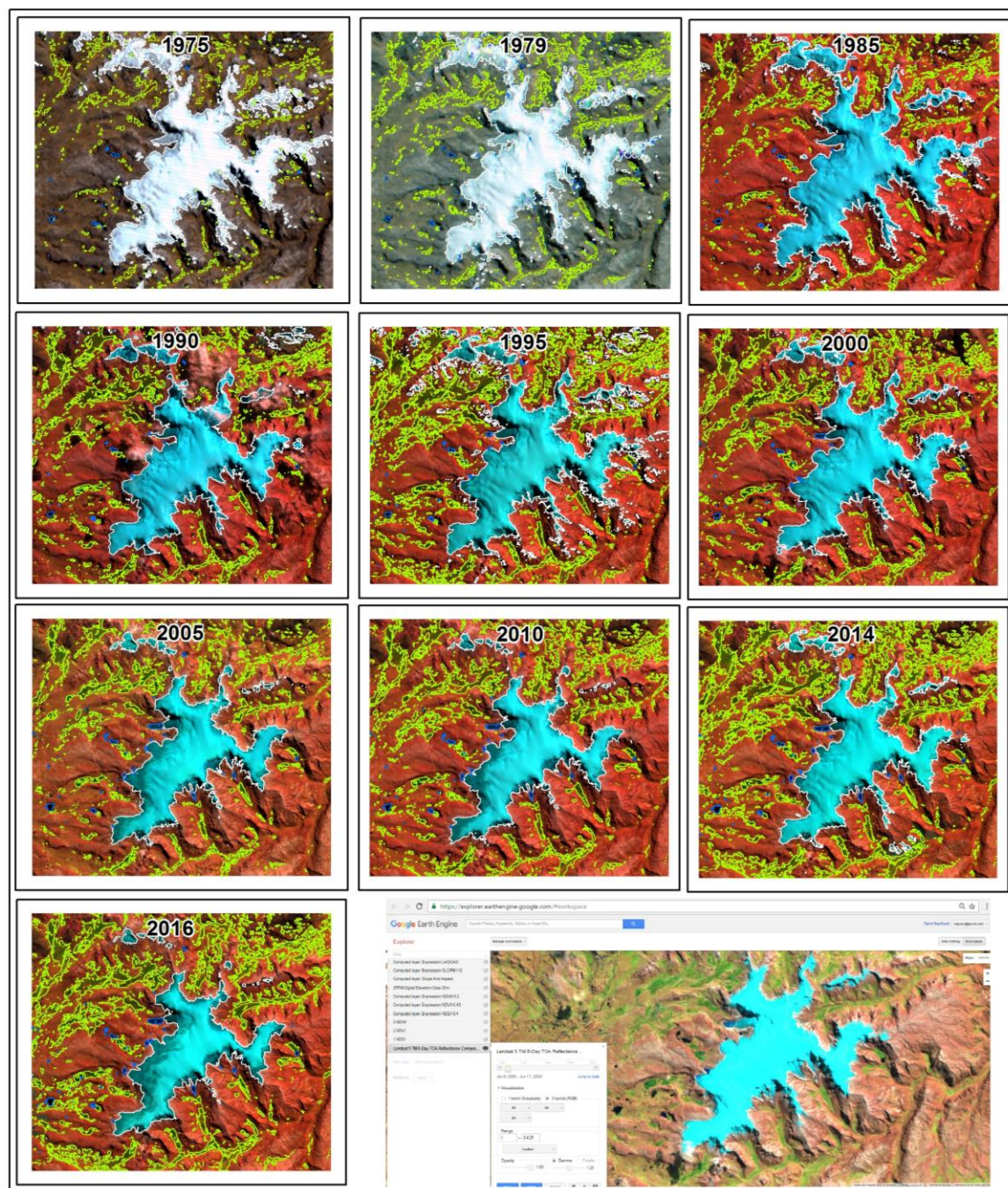


Figura 3. Imágenes Landsat multitemporales del año 1975 al 2016 (Glaciares en líneas blancas, Bofedales en líneas verdes y Lagunas en color azul), figura inferior derecha muestra la vista en GEE del glaciar Quelccaya. Fuente: elaboración propia.

La pérdida glaciár es evidente en el glaciár Quelccaya, en los últimos 41 años el Glaciár ha perdido más del 40% de su superficie, teniendo una pérdida promedio anual de 3.69 km<sup>2</sup>, siendo este el glaciár el más importante de todo el trópico en la tierra indica la condición de la mayoría de los glaciares, ver figura 3. En la figura 4 se puede apreciar que el comportamiento del glaciár y los bofedales son muy cercanos, porque cuando sube el glaciár los bofedales aumentan, pero siempre con una tendencia al aumento. En caso de las lagunas su comportamiento es muy lineal con aumento constante según la ecuación lineal mostrada en la figura 4.

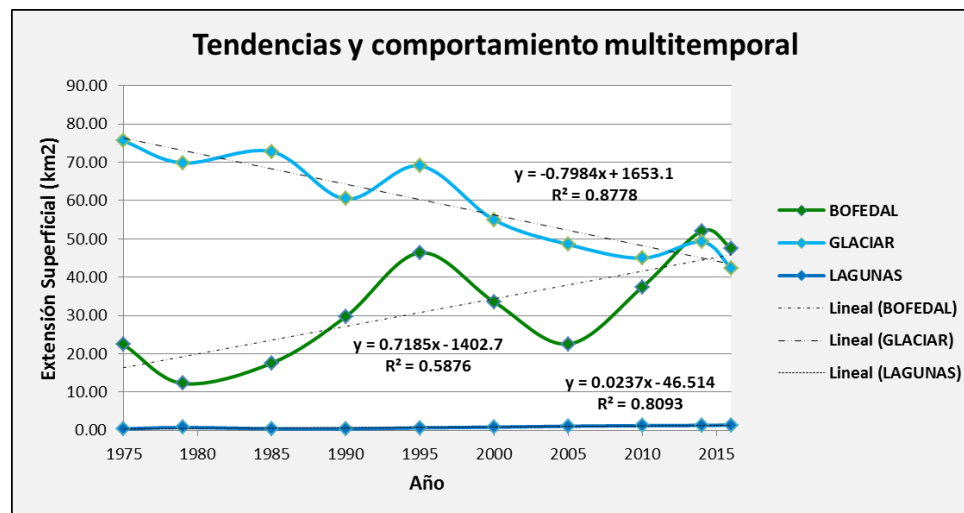


Figura 4. Tendencias y comportamiento multitemporal de Bofedales, glaciár y lagunas  
 Fuente: elaboración propia en base a la tabla 2.

Respecto a las metodologías o técnicas cabe indicar que existen otras técnicas de álgebra de mapas, para la extracción de cuerpos de agua en una imagen satelital como IIA (índice indicador de agua) propuesta por Polidorio et al., (2004). Para la detección de sombras en los próximos trabajos en ambientes con glaciár se recomienda considerar la ecuación de Macander et al., (2015).

#### 4. Conclusiones

Google Earth Engine es una herramienta eficiente de procesamiento en nube, para análisis de cambios multitemporales e espaciales, su utilización como herramienta PDI para la detección de cambios en los glaciares, bofedales y lagunas fue satisfactorio y siendo muy útil para este tipo de estudios. Posibilitando añadir imágenes de otras fuentes y ser procesados.

La hipótesis de la existencia de una relación temporal e espacial entre los Glaciares con los bofedales y lagunas es evidente y confirmada en los resultados de este estudio. Siendo este el primero estudios que relaciona las tres variables, se convierte en un aporte trascendental al conocimiento en los estudios de los glaciares., Los bofedales y las lagunas adyacentes dependen de los glaciares y son impactados por su desaparición en el glaciár más importante de los trópicos “Glaciár Quelccaya”.

#### Agradecimientos

A los docentes de la Universidad Nacional del Altiplano Puno (UNAP), Escuela profesional de Ingeniería Topográfica y Agrimensura (EPITA) Puno-Perú. Por su confianza, apoyo técnico y moral para aporte al conocimiento global.

A los docentes de la Universidad Estadual Feira Santana (UEFS), Bahia- Brasil, por su aporte y destacado conocimiento en el modelamiento de ambiental inspirando mayores resultados, especialmente para Flavio Jorge Ponzoni.



## Referencias Bibliográficas

- Brecher, H. H.; Thompson, L. G. Measurement of the retreat of Qori Kalis glacier in the tropical Andes of Peru by terrestrial photogrammetry. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 59, n. 6, p. 1017–1022, 1993. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1993PgERS..59.1017B>>.
- Buffen, A. M.; Thompson, L. G.; Mosley-Thompson, E.; Huh, K. I. Recently exposed vegetation reveals Holocene changes in the extent of the Quelccaya Ice Cap, Peru. **Quaternary Research**, v. 72, n. 2, p. 157–163, 2009. University of Washington. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2009.02.007>>.
- Castro, P. Á.; Vargas, J.; Bequer, P. Identificación de los cambios en la superficie de los bofedales de Apolobamba, utilizando herramientas de análisis geoespacial. , p. 1–7, 2014.
- Chávez, T.; Ortiz, D.; Loarte, E.; Albornoz, I.; Zambrano, A. Identificación de lagunas de Alta Montaña en el Perú mediante técnicas de Teledetección Espacial y Modelos de Elevación Digital. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, p. 7836–7843, 2011.
- Cook, S. J.; Kougkoulos, I.; Edwards, L. A.; Dortch, J.; Hoffmann, D. Glacier change and glacial lake outburst flood risk in the Bolivian Andes. **The Cryosphere Discussions**, , n. July, p. 1–27, 2016. Disponível em: <<http://www.the-cryosphere-discuss.net/tc-2016-140/>>.
- García, J. L.; Willems, B. L. Metodología para el Estudio de Bofedales en Cabeceras de Cuenca Usando Datos Imágenes de los Sensores TM, OLI a bordo de los Satélites Landsat - Caso Estudio: Bofedal Chunal, Cuenca Alta del río Chillón. : Avances. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, v. 7, n. 1, p. 6381–6388, 2015.
- Google, Earth Solidario. Introducción a Google Earth Engine, (2016). Disponible en: <[https://www.google.es/intl/es/earth/outreach/tutorials/eartheng\\_gettingstarted.html](https://www.google.es/intl/es/earth/outreach/tutorials/eartheng_gettingstarted.html)>. Acceso en: 15.oct. 2016.
- Macander, M. J.; Swingley, C. S.; Joly, K.; Reynolds, M. K. Landsat-based snow persistence map for northwest Alaska. **Remote Sensing of Environment**, v. 163, p. 23–31, 2015. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.028>>.
- Mark, B. G.; Seltzer, G. O. Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962–1999): Spatial distribution of mass loss and climatic forcing. **Quaternary Science Reviews**, v. 24, n. 20–21, p. 2265–2280, 2005.
- Ribeiro, R. R.; Simões, J. C.; Dani, N. Mudanças investigadas nas massas de gelo dos Andes tropicais. **RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 3, p. 131–145, 2010.
- Silverio, W.; Jaquet, J. M. Glacial cover mapping (1987–1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, n. 3, p. 342–350, 2005.
- Thompson, L. G.; Mosley-Thompson, E.; Bolzan, J. F.; Koci, B. R. A 1500-year record of tropical precipitation in ice cores from the Quelccaya ice cap, Peru. **Science**, v. 229, n. 4717, p. 971–973, 1985.
- Thompson, L. G.; Mosley-Thompson, E.; Brecher, H.; et al. Abrupt tropical climate change: Past and present. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 103, n. 28, p. 10536–10543, 2006. Disponível em: <<http://www.pnas.org/content/103/28/10536.abstract>>.
- Thompson, L. G.; Mosley-Thompson, E.; Henderson, K. A. Ice-core palaeoclimate records in tropical South America since the last glacial maximum. **Journal of Quaternary Science**, v. 15, n. 4, p. 377–394, 2000.
- Venturino, R.; Schall, U. M.; Solichin, U. J. Google Earth Engine As a Remote Sensing Tool. **International Journal of Remote Sensing & Geoscience**, p. 1–15, 2014.
- Vuille, M.; Francou, B.; Wagnon, P.; et al. Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. **Earth-Science Reviews**, v. 89, n. 3–4, p. 79–96, 2008.