

Delimitación, codificación de las cuencas hidrográficas según los métodos de Pfaftetter y Strahler utilizando Modelos de Elevación Digital y técnicas de Teledetección.

Alex Zambrano Ramírez

Judith Torres Castillo

Jessica Ibarra Gonzalez

Autoridad Nacional del Agua – ANA

Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, Av. Confraternidad Internacional Oeste N°167 -

Huaraz, Perú

glaciologia@ana.gob.pe

Abstract. Delineation and codification of 23 river basins of Peru through the use of geographic information systems and remote sensing techniques, has allowed the extraction of important information for the glacier and lakes inventory of the snowy mountains of Peru. Two methods were applied for the delimitation of the basins: (a) proposed by Otto Pfaftetter that has allowed to delineate basins and interbasin to level 7 and (b) the method based on Strahler methodology which helped to identify the watersheds, sub-basins and micro-basins on greater detail, for both methods was considered the criteria for classification and codification of international standards for watershed delineation recognized worldwide. To achieve the objective of delineation watersheds was generated mapping of support, so it was necessary generate contours from digital elevation models of the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and fill the gaps for non-coating aerial photography in the official national sheet map, and then generating a Digital Elevation Model (DEM) in more detail, and later model of Shadows (Hillshade), hierarchy order of rivers, etc. As a result we have the demarcation of watersheds by Strahler and Pfaftetter methods and total area of 222,146.952 km² and 219,982.197 km² respectively, approximately 17% of the area of Peru.

Keywords: basins, DEM, hillshade, SRTM, Pfaftetter, Strahler.

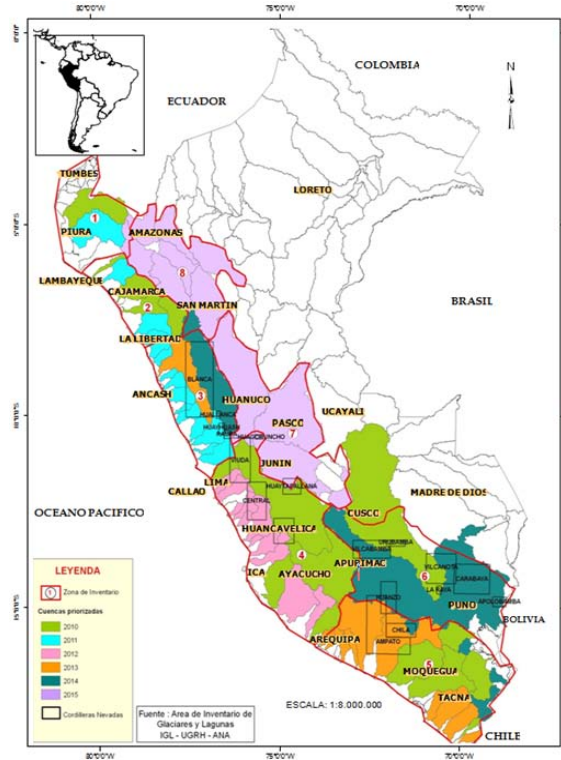
1. Introducción.

Existen diecinueve cordilleras nevadas en el Perú, pero el presente trabajo se realizo en nueve de estas cordilleras: Blanca, Huallanca, Huayhuash, Raura, La viuda, Central, Huagoruncho, Huaytapallana y Chonta, las cuales se encuentran ubicadas en los andes centrales del Perú situados entre las coordenadas 07°41'31" a 14°51'53" latitud sur y 73°17'8" a 78°18'01" de longitud oeste (Figura 1), la finalidad es tener una adecuada delimitación de las cuencas para poder actualizar los Inventarios de Lagunas y Glaciares.

En el Perú inicialmente la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN) en 1984, realizo un primer mapa de delimitación de cuencas a nivel nacional en donde se determinaron 106 cuencas hidrográficas, en el 2001 la Dirección General de Aguas y Suelos del Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) determino 107 cuencas hidrográficas en tres vertientes hidrográficas (Pacífico, Atlántico y Titicaca), en el 2008 la Intendencia de Recursos Hídricos del INRENA propone incorporar estándares internacionales de delimitación, codificación y clasificación de cuencas hidrográficas basado en el método desarrollado en 1989^[1] por Otto Pfaftetter. Sin embargo para el detalle requerido en un inventario de glaciares y lagunas fue necesario llegar a niveles de codificación y delimitación de 5, 6 y/o 7 según el método Pfaftetter y adicionalmente se tuvo que recurrir como método complementario al propuesto por Strahler, el cual se basa en órdenes de corrientes jerarquizados de ríos permitiendo así la delimitación de cuencas, subcuencas y microcuencas.

Para la clasificación de los elementos geográficos de cuencas hidrográficas y redes hídricas fue necesario contar con herramientas computacionales como los sistemas de información geográfica.

Figura 1. Mapa de ubicación de las cuencas hidrográficas para el inventario de los glaciares y lagunas del Perú



2. Metodología.

Para realizar la delimitación de cuencas hidrográficas mediante la utilización de los Sistemas de Información Geográfico y Teledetección, se ha requerido utilizar información como: (a) Unidades hidrográficas del Perú (Nivel 4), según método Pfasftetter del Instituto Nacional de Recursos Naturales. (b) Curvas de nivel del Instituto Geográfico Nacional (Escala 1:100,000). (c) Red hídrica del Instituto Geográfico Nacional (Escala 1:100,000). (d) Lagunas del Instituto Geográfico Nacional (Escala 1:1000,000). (e) Cobertura Glaciar del primer Inventario de los Glaciares del Perú (1987). (f) Modelos de elevación digital del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con resolución de 90 m. y (g) Imágenes de Satélites: Landsat , Aster y Spot.

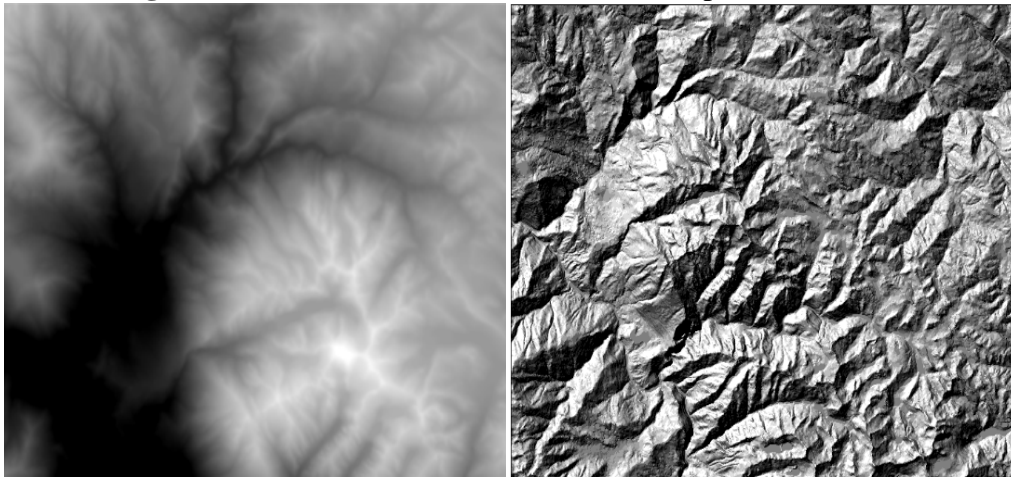
Generación del Modelo de Elevación Digital.

La obtención del Modelo Digital de Elevación (MED) a una resolución de 30 metros, se realizó por interpolación de los vectores de curvas, ríos, lagunas y cotas obtenidas a partir de las cartas nacionales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:100,000 utilizando el software ArcGIS y su extensión 3D Analyst. Previamente estos vectores pasaron por un control de calidad (verificación y edición) y digitalización de elementos faltantes debido a que en algunos sectores no se contaba con restitución fotogramétrica por la nubosidad imperante, por lo que tuvo que generarse información de curvas de nivel con 50 metros de equidistancia a partir del modelo de elevación digital proporcionado por Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) para cubrir dichos sectores. Estó permitió asegurar un resultado óptimo del Modelo de Elevación.

Generación de modelo de sombra.

Una vez generado el Modelo de Elevación Digital (MED) y utilizando la herramienta 3D Analyst de ArcGIS, se creó el mapa de iluminación hipotética (Hillshade) o modelo de sombra, esta capa fue usada para la delimitación de cuencas permitiendo visualizar con cierto grado de realismo la topografía del terreno. (Figura 2.)

Figura 2. Obtención del modelo de sombra a partir del MED.



Generación de la jerarquía de orden de ríos según Strahler.

La jerarquía de orden de ríos u orden de corriente de Strahler, también denominada el número de Strahler o número de Horton-Strahler, es una forma numérica que expresa la complejidad de una ramificación. Se obtuvo a partir del modelo de elevación digital mediante información sobre los flujos acumulados. Con esta herramienta se le asignó un orden jerárquico a los distintos cursos que conforman la red de una cuenca dada (estos ordenes son del 8 al 1), el producto es una capa que indica hacia donde drena la red hídrica en cada punto específico mejor dicho la desembocadura de la cuenca.

Delimitación de Cuencas, método Pfafstetter.

En este proceso se utilizó la información generada en las etapas anteriores, es decir la cartografía validada, el modelo de elevación digital y modelo de sombras.

Para la delimitación según Pfafstetter, se subdividió las cuencas hidrográficas, identificando los cuatro mayores afluentes en términos de área y longitud al río principal luego se proyectó hasta el límite de la cuenca mayor para obtener las intercuenas.

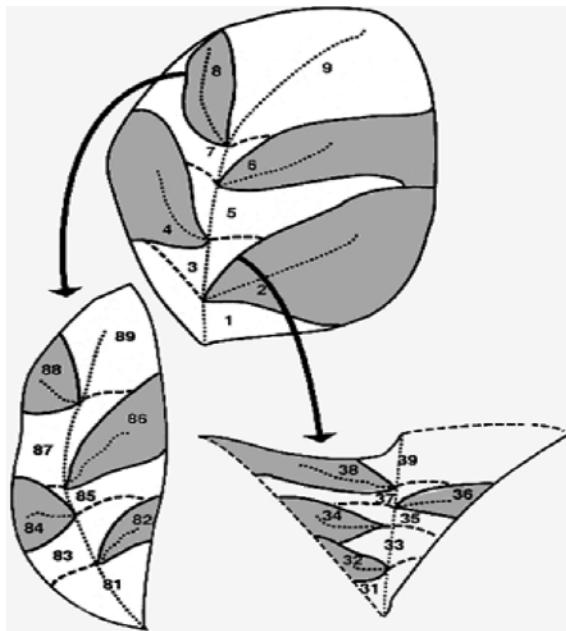
La codificación de las cuencas correspondientes a esos tributarios son enumerados con los dígitos pares (2, 4, 6 y 8), iniciando en la desembocadura y siguiendo el río principal aguas arriba hasta la naciente del río principal. Los otros tributarios del río principal son agrupados como áreas restantes y denominadas intercuenas, cuya numeración es asignada con los dígitos impares (1, 3, 5, 7 y 9).

Cada una de esas cuencas e intercuenas, resultantes de esa primera subdivisión, pueden ser subdivididas de la misma manera, de modo que la subdivisión de una cuenca codificada con el número 8 genera las cuencas 82, 84, 86 y 88 y las intercuenas 81, 83, 85, 87 y 89.

El mismo proceso se aplica a las intercuenas resultantes de la primera división, de modo que la intercuenca 3, por ejemplo, se subdivide en las cuencas 32, 34, 36 y 38 y en las intercuenas 31, 33, 35, 37 y 39. Los dígitos de la subdivisión son simplemente agregados al código de la

cuenca (o intercuenca) que está siendo dividida ^[2] (Figura 3). En el caso de encontrar una cuenca que no tiene afluentes hacia el río principal se le denomina cuenca endorreica o interna y lleva por codificación cero.

Figura 3. Codificación de cuencas según el método Pfafstetter.

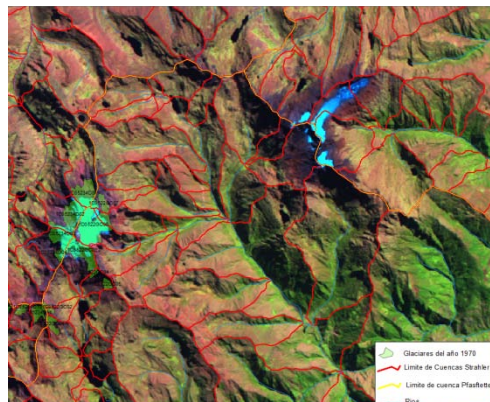


Delimitación de Cuencas, método Strahler.

Para este método se requirió el modelo de sombra (Hillshade), la jerarquía de orden de ríos, cuencas e imágenes de Satélites: Landsat, Aster y Spot, estas imágenes permitieron la delimitación de cuencas en zonas de escasa información cartográfica.

El método de Strahler es la medida de la ramificación del cauce principal de cada cuenca, la aplicación de este método permitió delimitar la cuenca principal en función a la jerarquía de orden de ríos, considerando el primer orden del cauce del río aquel que no tiene ningún tributario, segundo orden es uno que posee únicamente ramificaciones de primer orden, es decir, que es la resultante de la confluencia de dos corrientes de orden uno, el cauce del tercer orden es el que posee solamente ramificaciones de primero y segundo orden, y es originado por la unión de dos cauces de orden dos y sucesivamente hasta lograr el orden octavo que esta dado por el número de orden del cauce principal.

Para el ámbito de las cordilleras del Perú se delimitaron las cuencas hidrográficas según el orden del cauce del río principal: las cuencas con orden 8 y 7, las subcuencas con orden 5 y 4, las microcuencas con orden 3 y finalmente en los casos de presencia de glaciares y/o lagunas se delimitaron hasta el nivel 2 y 1, ya que este detalle es importante para la caracterización de glaciares y lagunas a inventariar. Asimismo se asignó la toponimia a cada cuenca, subcuenca y microcuenca en función al nombre del río que desemboca a una red hídrica mayor.

Figura 4. Delimitación de cuencas con ayuda de imagen Landsat.

3. Resultados y Discusiones.

Para las 23 cuencas Hidrográficas que corresponde a las cordilleras nevadas del Perú y que constituye el 17% de la superficie del mismo se obtuvo los siguientes resultados según los métodos de Pfafstetter y Strahler.

Tabla 1. Nivel alcanzado por el método Pfafstetter según cuenca, cordillera y área.

N°	Cuencas	Cordilleras	Cuencas Hidrográficas (Método Pfafstetter)				Área (Km ²)
			Nivel y Código inicial		Niveles y Códigos Alcanzados		
			Nivel	Código	Nivel	Código	
1	Mantaro	Chonta, Central, La Viuda, Huaytapallana	4	4996	5,6,7	4996989	34363.183
2	Pachitea	Huagoruncho	4	4992	5,6,7	4992999	28495.6261
3	Pampas	Chonta	4	4998	5,6,7	4998999	23113.0464
4	Santa	Blanca	4	1376	5,6,7	1376999	11596.5153
5	Ica	Chonta	4	1374	6,7	1375529	7301.8761
6	Anapetí	Huaytapallana	5	49958	6,7	4995899	1545.5836
7	Alto Maraón V	Huagoruncho, La Viuda, Raura	5	49899	6,7	4989999	21553.6852
8	Perené	Huaytapallana	5	49954	6,7	4995449	18254.1501
9	Pisco	Chonta	5	13752	6,7	1375299	4208.7453
10	Cañete	Central	5	13754	6,7	1375499	6017.3432
11	Huaura	Raura, La Viuda, Huayhuash	5	13756	6,7	1375699	4310.9142
12	Alto Huallaga	Huagoruncho, La Viuda	5	49849	6,7	4984999	30275.8662
13	Pativilca	Huallanca, Huayhuash, Raura	5	13758	6,7	1375899	4577.2374
14	Chicama	Blanca	5	13772	6,7	1377299	4493.738
15	Crisnejas	Blanca	5	49898	6,7	4989829	4909.6836
16	Mala	Central	6	137552	6	1375529	2319.7069
17	San Juan	Chonta	6	137532	7	1375329	3335.4362
18	Topara	Chonta	6	137534	7	1375349	616.9655
19	Chillón	La Viuda	6	137556	7	1375569	2210.513
20	Rímac	La Viuda	6	137554	7	1375549	3485.3575
21	Moche	Blanca	6	137716	7	1377169	2115.4118
22	Chancay- Haural	La Viuda	6	137558	7	1375589	3046.3674
Total							222,146.952

La delimitación de cuencas según pfafstetter se realizo en un total de 22 cuencas hidrográficas con un área total de 222,146.952 km² hasta el nivel 7 esta delimitación estandarizada a nivel mundial contribuye a la planificación y gestión de los recursos hídricos.

Figura 5. Cuencas Hidrográficas según el método Pfafstetter.

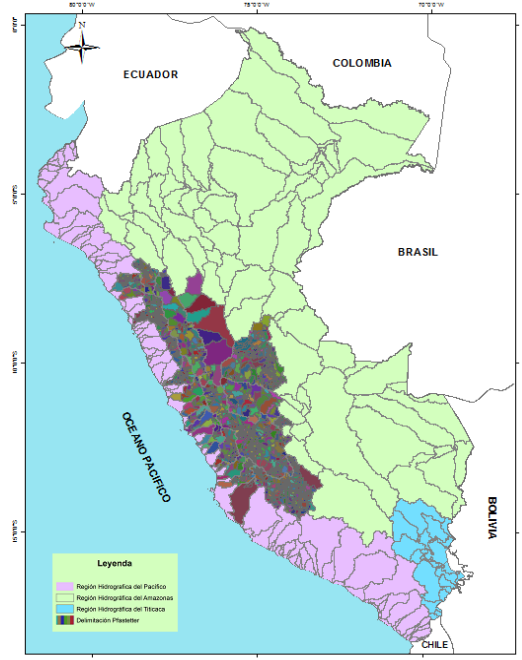
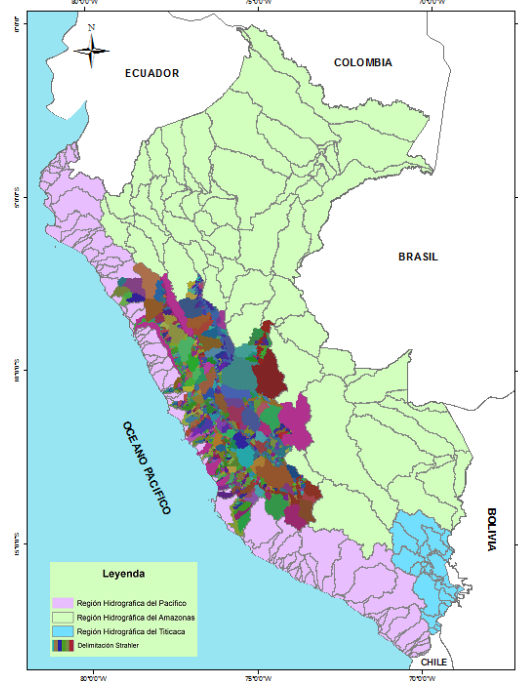


Tabla 2. Numero de cuencas delimitadas por el método Strahler según cuenca, cordillera y área.

Nombre de la cuenca	Cordillera	Cuencas Hidrográficas (Método Strahler)			Áreas delimitadas (Km ²)
		Cuenca	Subcuenca	Microcuenca	
		Cantidad de cuencas delimitadas			
Anapati	Huaytapallana	1	21	11	1545.5836
Cañete	Central	1	51	198	6017.3432
Chancay-Huaral	La Viuda	1	24	66	3046.3674
Chicama	Blanca	1	2	5	4493.738
Chillón	La Viuda	1	63	59	2210.513
Alto Huallaga	Huagoruncho, La Viuda	1	112	47	30275.8662
Huaura	Raura, La Viuda, Huayhuash	1	38	66	4310.9142
Ica	Chonta	1	21	8	7301.8761
Lurín	Central	1	12	6	1633.8095
Mala	Central	1	19	11	2319.7069
Mantaro	Chonta, Central, La Viuda, Huaytapallana	1	109	282	34363.183
Alto Marañón V	Huagoruncho, La Viuda, Raura	1	60	105	21553.6852
Moche	Blanca	1	24	12	2115.4118
Omas	Central	1	14	1	1111.1191
Páchitea	Huagoruncho	1	19	22	28495.6261
Pampas	Chonta	1	69	73	23113.0464
Pativilca	Huallanca, Huayhuash, Raura	1	57	46	4577.2374
Perené	Huaytapallana	1	21	119	18254.1501
Pisco	Chonta	1	23	22	4208.7453
Rímac	La Viuda	1	21	54	3485.3575
San Juan	Chonta	1	30	24	3335.4362
Santa	Blanca	1	40	311	11596.5153
Topara	Chonta	1	8	0	616.9655
Total		23	858	1548	219,982.197

Los límites de estas cuencas en algunos casos coinciden con el límite del método Pfasftetter, ya que identifica 4 cuencas principales para cada nivel. Se delimitaron 23 cuencas hidrográficas, 858 subcuencas y 1548 microcuencas según Strahler. El área total delimitada fue de 219,982.197 km².

Figura 6. Delimitación de Microcuencas según el método Strahler.



4. Conclusiones.

El área total delimitada por el método Pfasftetter es de 222,146.952 km² con un equivalente a 2631 unidades hidrográficas en nivel 7, obteniéndose 1779 unidades en la vertiente del Amazonas y para la vertiente del Pacífico con 852 unidades hidrográficas correspondiente a 22 cuencas hidrográficas y en el método Strahler se delimitaron 23 cuencas Hidrográficas con un área total de 219,982.197 km², determinando 10799 polígonos que representan cuencas, subcuencas y microcuencas. Ambos métodos corresponden a 9 cordilleras nevadas del Perú: Blanca, Huallanca, Huayhuash, Raura, La viuda, Central, Huagoruncho, Huaytapallana y Chonta.

Las cuencas hidrográficas delimitadas según los métodos de Pfasftetter y Strahler con la aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) y técnicas de teledetección han permitido un ahorro de tiempo considerable en el desarrollo de una base cartográfica estándar de las cuencas hidrográficas, la cual representa un 17% de la superficie territorial de Perú. Esta información permitirá inventariar, actualizar y codificar los glaciares y lagunas de las nueve cordilleras nevadas del Perú.

Agradecimiento.

El presente artículo se ha realizado dentro del Proyecto de Inventario Nacional de Lagunas y Glaciares del Perú, específicamente en el Área de Inventario, financiado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), perteneciente al Ministerio de Agricultura. Así mismo se agradece a

la iniciativa de Planet Actions por la licencia otorgada del software ArcGIS el cual permitió el procesamiento de los datos y a la NASA por la disponibilidad gratuita de las imágenes de satélite Landsat que ayudó a aplicar las técnicas de la teledetección espacial.

Referencias Bibliografía.

- [1] Báez, M., 2007. Codificación de la Subcuenca Pariac con el Método Pfasftetter. Trabajo de investigación para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Agrícola, Universidad Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz (Perú), 15 p.
- [2] Aguire, M, Ruiz, R, Torres, H. 2005 Delimitación y Codificación de Cuencas Hidrográficas Del Peru, Instituto Nacional de Recursos Naturales Intendencia de Recursos Hídricos (INRENA).
- [3] Alvin Lisandro Lopez Lopez, Karen Aracely delgado soriano (2009). Modelación hidrológica de la subcuenca Lempa Alto, en cooperacion con la comision trinacional del plan trifinio (el Salvador, Honduras, Guatemala. tesis para optar el grado de ingeniero civil. universidad de el Salvador. Facultad Multidisciplinaria de occidente departamento de Ingenieria y Arquitectura.
- DIRHI-IRH/INRENA, 2001 Manual de Procedimientos de Codificación de Cuencas Hidrográficas, Lima, Perú.
- [4] José L. García-Pugal y Hinojosa-Corona, 2001. Aplicación de tres métodos de sistemas de información geográfica para la caracterización de la hidrología superficial en la región de puertecitos-San Luis Gonzaga, B.C. GEOS, Unión Geofísica Mexicana.