



Enfoque UTE

E-ISSN: 1390-6542

enfoque@ute.edu.ec

Universidad Tecnológica Equinoccial
Ecuador

Jumbo Castillo, Freddy Aníbal
Delimitación automática de microcuencas utilizando datos SRTMde la NASA
Enfoque UTE, vol. 6, núm. 4, octubre-diciembre, 2015, pp. 81-97
Universidad Tecnológica Equinoccial

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=572260849006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Delimitación automática de microcuencas utilizando datos SRTM de la NASA

(Automatic delimitation of microwatershed using SRTM data of the NASA)

Freddy Aníbal Jumbo Castillo¹

Resumen:

La cuenca hidrográfica considerada como la unidad territorial básica de planificación y gestión de los recursos hídricos, requiere la adecuada delimitación del área de captación o drenaje, ante tal situación la carencia de información geográfica de microcuencas de la unidad hidrográfica del río Casacay debe solucionarse, para tal efecto la investigación tuvo como objetivo la delimitación automática de microcuencas utilizando técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y datos del proyecto Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) de 30 metros de resolución espacial. La metodología seleccionada fue la de Pfafstetter, con la cual se obtuvieron nueve microcuencas con su respectiva codificación, permitiendo continuar con la estandarización de cuencas adoptada por la Secretaría del Agua de Ecuador. Con los resultados de la investigación se actualiza la información de cuencas con mayor detalle, favoreciendo la ejecución de las tareas o actividades relacionadas con la gestión integral de la unidad hidrográfica estudiada.

Palabras clave: Cuenca hidrográfica; método Pfafstetter; delimitación automática; Modelo Digital de Elevación, Sistemas de Información Geográfica.

Abstract:

The watershed as the basic territorial unit of planning and management of water resources, requires its proper delimitation of the catchment or drainage area, faced with this situation, the lack of geographic information of Casacay river micro watersheds, hydrographic unit should be resolved, for this purpose the research was aimed at automatic delimitation of micro watersheds using of Geographic Information Systems (GIS) techniques and the project Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) 30 meters spatial resolution data. The selected methodology was the Pfafstetter one, with which nine micro watersheds were obtained with their respective codification allowing to continue with watersheds standardization adopted by Ecuador Water's Secretariat. With the investigation results watersheds will be updated with more detail information, promoting the execution of tasks or activities related to the integrated management of the hydrographic unit studied.

Keywords: Watershed; Pfafstetter method; automatic delimitation; Digital Elevation Model; Geographic Information Systems.

¹ Universidad Técnica de Machala, Machala –Ecuador (fjumbo@utmachala.edu.ec)

1. Introducción

El Ecuador a través de la Secretaría del Agua, se encarga de la gestión de los recursos hídricos, en cumplimiento a lo estipulado en la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua publicado en el Registro Oficial N° 305 del 6 de agosto de 2014, donde se considera a la cuenca hidrográfica como la unidad territorial básica de planificación y administración de los recursos existentes en su entorno.

De acuerdo al CNRH (2002), la cuenca es aquella área de drenaje que está delimitada por una línea divisoria de las aguas, la cual corresponde a las máximas alturas o elevaciones. En 1989 con Pfafstetter surge el concepto de unidad hidrográfica, definiéndola como áreas de drenaje cuyos límites se encuentran definidos por las líneas divisorias de aguas, relacionadas por su código espacialmente y cuya jerarquización se basa en el tamaño de las áreas de captación. La importancia de la cuenca como unidad de planificación, radica en que al funcionar sistémicamente no solo se analizan aspectos hidrológicos, sino también desde la perspectiva biológica o ambiental.

Según Gomes & Lobão (2009), la delimitación de cuencas es fundamental y va más allá del establecimiento del límite natural del área de drenaje, hasta convertirse en la unidad principal de análisis ambiental, permitiendo identificar y evaluar procesos, así como las interacciones que en ella ocurran, aspectos esenciales para la planificación y toma de decisiones sobre los recursos naturales. Lo anteriormente mencionado aplica también para la definición de microcuenca y es corroborado por Casillas (2006), quien manifiesta que microcuencas son las unidades naturales que sirven como base territorial para articular procesos de gestión, que promueven el desarrollo integral y sustentable.

La delimitación automática de áreas de drenajes, ha remplazado el método tradicional realizado manualmente sobre la carta topográfica, disminuyendo esfuerzos y optimizando recursos. El procedimiento para la obtención de cuencas, subcuencas y microcuencas hidrográficas, se ha fortalecido en función al crecimiento vertiginoso que han tenido en los últimos años los Sistemas de Información Geográficos (SIG), que han aportado con nuevas herramientas enfocadas a estudios hidrográficos. Para Guevara (1987), los SIG se han adaptado a los avances tecnológicos, proporcionando nuevos medios para la manipulación y análisis de información en función a la perspectiva del usuario y del problema a resolver.

Varios estudios realizados para la obtención de unidades hidrográficas, han utilizado como insumo principal los datos liberados por la misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), destacándose los aportes de Alves et al. (2010), Pontes et al. (2009) y Gomes et al. (2007). El SRTM obtuvo información altimétrica de la tierra utilizando la técnica radar interferometría, la cual

se encuentra disponible públicamente a nivel mundial, en las versiones de 3 y 1 segundo de arco; es decir de 90 y 30 metros de resolución espacial respectivamente.

Una de las metodologías para la delimitación de unidades hidrográficas es la de Pfafstetter, en los últimos años utilizada en varios países de Sudamérica, como demostración de su aplicación sobresalen los trabajos de Pires & Faria (2013), Gomes & Barros (2011), Secretaría del Ambiente (2011), UICN Sur & SGCAN (2010) y UICN (2009b). El Ecuador a través de la Secretaría del Agua (2011), oficializó la información geográfica de cuencas hasta el nivel 5 generadas según el método Pfafstetter, las cuáles son análogas a la denominación de subcuencas y obtenidas utilizando el MDE de 90 metros de resolución espacial, que según la UICN (2009a), no era óptimo para incrementar los niveles de subdivisión de unidades hidrográficas.

La unidad hidrográfica del río Casacay es una de las más representativas de la cuenca baja del río Jubones dadas las actividades que en ella se ejecutan, por lo cual la falta de información espacial de unidades de drenaje a mayor detalle, equivalentes al nivel de microcuencas afectan los procesos de gestión relacionados con los recursos hídricos, así como las tareas enfocadas a la conservación del paisaje natural. De este modo el objetivo de este trabajo es delimitar automáticamente las microcuencas correspondientes a la unidad hidrográfica del río Casacay, utilizando técnicas de SIG y datos SRTM de 30 metros de resolución espacial, que permita la actualización de información geográfica, para el soporte a la correcta toma de decisiones en la gestión y conservación de los recursos hídricos.

Como hipótesis se planteó lo siguiente: La resolución espacial del MDE influye significativamente en la delimitación de las microcuencas de la unidad hidrográfica del río Casacay.

2. Metodología

La unidad hidrográfica del río Casacay, geográficamente está localizada en la parte baja de la cuenca del río Jubones, correspondiente a la Demarcación Hidrográfica de Jubones (DHJ), como se puede apreciar en la *Figura 1*. Su extensión territorial es de 12,178 ha y cubre parte de los cantones de Chilla y Pasaje, pertenecientes a la provincia de El Oro.

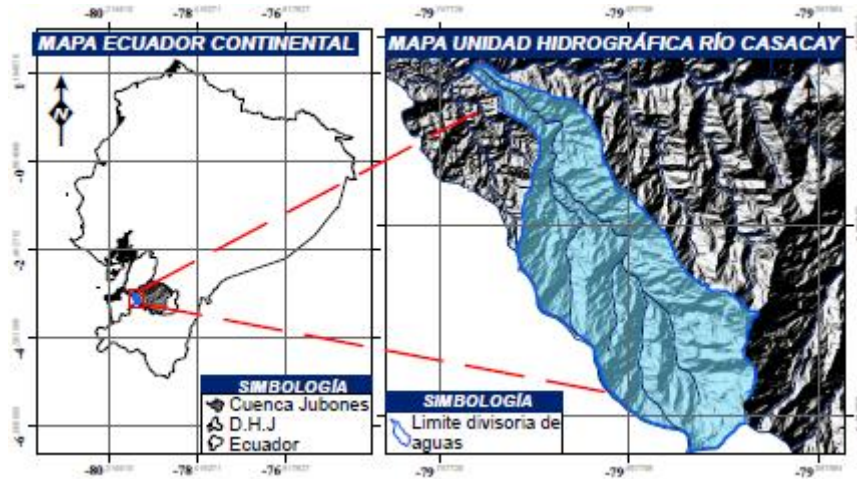


Figura 1. Ubicación geográfica de la subcuenca del río Casacay.

Las coordenadas métricas de localización de la unidad hidrográfica en datum WGS84 UTM Zona 17 Sur, se especifican en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Coordenadas de localización.

Orientación	X	Y
NORTE	641,017	9,633,388
SUR	655,268	9,614,627
ESTE	655,913	9,620,502
OESTE	643,178	9,623,799

La cartografía base existente para la ejecución de este proyecto, es la unidad hidrográfica en nivel 5 del río Casacay, así como la cartografía oficial liberada por el Instituto Geográfico Militar (IGM) a escala 1:50,000 y 1:250,000, correspondiente a la hidrografía del área de estudio. Los archivos se encuentran disponibles en formato shapefile.

El proceso de delimitación se regirá bajo las normativas establecidas por el método Pfafstetter, que según la UICN (2009b), identifica 3 tipos de unidades hidrográficas descritas a continuación:

- Cuenca: Es el área de captación que no recibe drenaje de ninguna otra área, pero que sí aporta con flujo a otra unidad hidrográfica.
- Intercuenca: Es considerada como una unidad de drenaje de transito del río principal, a la cual también aporta su propio recurso hídrico. Se puede mencionar también, que es aquella unidad que capta el flujo de una unidad hidrográfica que se ubica aguas arriba, y que drena por el río principal conjuntamente con el caudal que genera.
- Cuenca interna: Es el área de drenaje aislada que no recibe flujo ni aporta caudal a otra área de captación.

La metodología Pfafstetter seleccionada para el proceso de delimitación de las microcuencas se representa gráficamente a través de la *Figura 2*.



Figura 2. Diagrama de la metodología.

Cada una de las etapas de la metodología se llevará a cabo utilizando la herramienta de SIG ArcGIS 10, las cuales son descritas a continuación:

Obtención de datos SRTM y pre-procesamiento: Los datos altimétricos de 30 metros de resolución espacial correspondiente al MDE del área de estudio, están disponibles para la descarga desde la página <http://earthexplorer.usgs.gov/>. En el visor se especifican las coordenadas de localización de la unidad hidrográfica del río Casacay.

El pre-procesamiento consiste en la eliminación de imperfecciones de fuente de origen presentes en el MDE, dentro de los cuales se encuentran las zonas sin datos o vacías “*NoData*”, que según Olaya (2011) deben corregirse aplicando métodos de interpolación. Otro factor que afecta la calidad de los datos SRTM, es la presencia de picos y sumideros, que de acuerdo a Medeiros et al. (2009), las imperfecciones presentes en el modelo de datos ocasionan errores en el mapa de la dirección de flujo.

Una de las formas de eliminar la presencia de valores *NoData* en el modelo es mediante estadísticas focales, procedimiento que se efectúa a través del la herramienta *ArcToolbox>Spatial Analyst Tools>Map Algebra>Raster Calculator*. Posteriormente se corrijen los picos y sumideros a través del recurso *Spatial Analyst>Hidrology>Fill*.

Dirección de flujo: En esta etapa se obtiene un raster con las orientaciones de flujo de cada celda vecina, calculadas en función a las pendientes. Walchholz et al. (2013), menciona que las direcciones de flujo expresan las relaciones hidrológicas entre diferentes puntos de una cuenca hidrográfica.

Para ESRI(2013a), el cálculo de dirección de flujo es un proceso sigue la secuencia mostrada en la *Figura 3*.

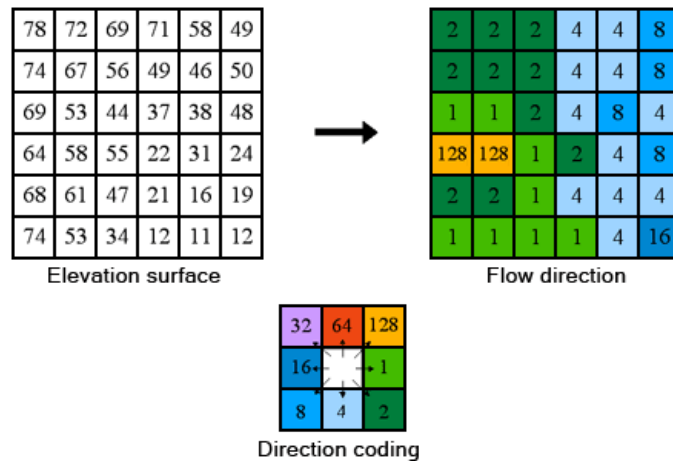


Figura 3. Procedimiento de cálculo de dirección de flujo.

La dirección de flujo se obtiene a través del recurso *ArcToolbox>Spatial Analyst>Hidrology>Flow Direction*.

Acumulación de flujo y cálculo del umbral: La acumulación de flujo determina todas las celdas que drenan a una en particular, la cual se obtiene a partir de la dirección de flujo. Según Venkatachalam et al. (2001), la acumulación de flujo en una celda se establece en función a la suma de los valores de acumulación de flujo de las celdas vecinas que desembocan en ella.

De acuerdo a ESRI (2013b), la acumulación de flujo es un proceso que sigue la secuencia especificada en la *Figura 4*.

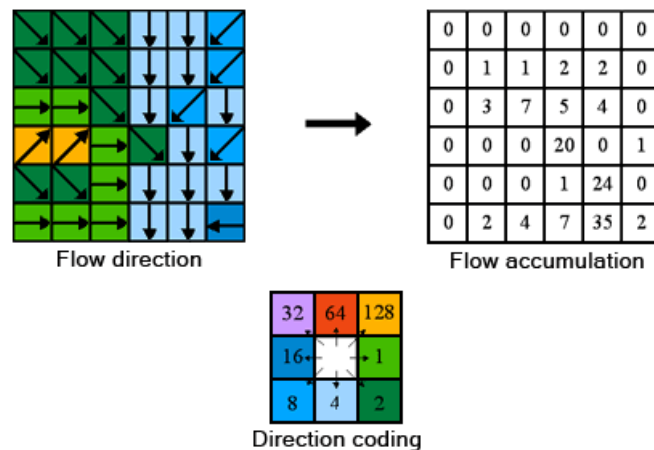


Figura 4. Procedimiento de cálculo de acumulación de flujo.

La acumulación de flujo se obtiene a través del recurso *ArcToolbox>Spatial Analyst>Hidrology>Flow Accumulation*.

La siguiente tarea se denomina cálculo del umbral, que para ESRI (2012), el proceso requiere del raster de acumulación de flujo y la cantidad mínima de celdas que forman el curso de agua, las cuales corresponden al valor del umbral. De acuerdo a la UICN (2009a), se obtiene mediante un procedimiento repetitivo de ensayo y error, con el cual se determina el umbral de acumulación que permite identificar el afluente principal y cuatro aportantes. Con los resultados se determinan las 4

unidades de drenaje tipo cuenca y 5 de tipo intercuenca, correspondiéndoles a las primeras las mayores áreas de drenaje y acumulación de flujo según el método Pfafstetter.

En ArcGIS el proceso se realiza desde ventana *Layer>Properties>Symbology>Classified>Classify*, donde se especifica la clasificación en dos rangos o clases aplicando el método *Natural Breaks - Jenks*; el primero va de 1 a N valor calculado por la herramienta, mientras que el segundo del N valor al número máximo que alcanza la acumulación de flujo. El valor N es con el cual se realizan los ensayos a través de la opción *Classify>Break Value*.

El cálculo del umbral finaliza con la reclasificación de los resultados obtenidos, y se realiza por medio de la herramienta *ArcToolbox>Spatial Analyst Tools>Reclass>Reclassify*, asignándole el valor de 0 al primer rango y 1 al segundo rango, siendo el segundo rango el requerido para la siguiente etapa del proceso, ya que almacena los afluentes principales. (UICN Sur & SGCAN, 2010)

Red de drenajes: La generación de la red de drenajes es fundamental para la determinación de las cuencas hidrográficas, el insumo principal en esta etapa es la reclasificación de la acumulación del rango cuyo valor asignado fue 1 en la anterior fase.

El procedimiento se realiza desde la caja de herramientas *ArcToolbox>Spatial Analyst Tools>Hydrology>Stream Link*. Según criterio de Johnson (2008), *Stream Link* asigna valores únicos a las secciones de una red de drenajes entre las intersecciones, que para la UICN (2009b), los enlaces o links son los segmentos de una red de drenajes que conectan a dos aportantes de forma sucesiva.

Generación de cuencas: Según Alves et al. (2010), el proceso para la generación de las áreas de drenaje requiere del mapa de dirección y acumulación de flujo y se lo realiza mediante la herramienta *ArcToolbox>Spatial Analyst Tools>Hydrology>Watershed*.

Para UICN (2009b), *Watershed* establece el área aportante de la cuenca que drena dentro de ella y fluye a una determinada salida.

Vectorización y codificación: La vectorización consiste en convertir las cuencas de formato raster a vector. Es la etapa final de la metodología y arroja como resultado el archivo shapefile con los polígonos de las unidades hidrográficas delimitadas. De acuerdo a lo establecido por la UICN(2009b) en el manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas para el Ecuador, la vectorización de las cuencas se logra a través de la siguiente herramienta *ArcToolbox>Conversion Tools>From Raster>Raster To Polygon*.

Las codificación de cuencas hidrográficas basadas en el método Pfafstetter (1989), es jerárquica y utiliza 10 dígitos relacionados directamente con el área de drenaje y cursos de agua. Según Galvão & Meneses (2005), los códigos pares 2, 4, 6 y 8 se asignan a las cuatro cuencas

principales a las cuales corresponden las mayores áreas de drenaje, mientras que las intercuenas identifican a las cinco unidades de drenaje de menor tamaño y reciben los dígitos 1, 3, 5, 7 y 9. La Secretaría del Ambiente (2011), corrobora lo manifestado por los autores anteriormente, pero además manifiesta que en caso de existir intercuenas, éstas se codifican con el dígito 0, como se puede observar en la *Figura 5*.

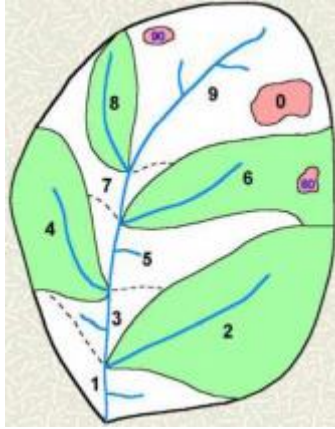


Figura 5. Codificación del método Pfafstetter.

El proceso de codificación se realiza desde aguas abajo (desembocadura), hacia aguas arriba (naciente de la cuenca). En ArcGIS el dígito correspondiente a cada unidad hidrográfica se asigna en la tabla de atributos del archivo vectorial shapefile de las unidades delimitadas.

3. Resultados y Discusión

Los resultados son presentados en función a los productos obtenidos en cada etapa de la metodología:

Obtención de datos SRTM y pre-procesamiento: Se descargó el MDE en formato GeoTIFF, de acuerdo a las coordenadas de localización de la unidad hidrográfica del río Casacay. Como resultado del pre-procesamiento se corrigieron las celdas que contenían valores *NoData* y se eliminaron los picos y sumideros presentes en el modelo, lo cual se puede observar en la *Figura 6*.

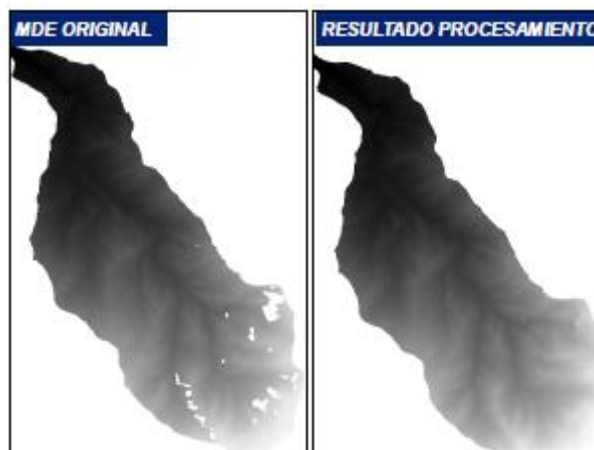


Figura 6. Resultados obtención de datos y pre-procesamiento.

Es fundamental para el desempeño eficaz de las siguientes etapas de la delimitación, las correcciones realizadas al MDE, dentro de las cuales se encuentra el llenado de celdas de valores *NoData* y la depuración de picos y sumideros. El orden de ejecución de las correcciones garantizó el resultado del procesamiento.

Se destaca en la optimización del modelo la aplicación de estadísticas focales, el uso del álgebra de mapas, los algoritmos de interpolación del vecino próximo y la definición de un radio de acción de 10 celdas.

Dirección de flujo: Se obtuvo el raster de la dirección de flujo, en donde cada celda almacena el valor de dirección con pendiente máxima.

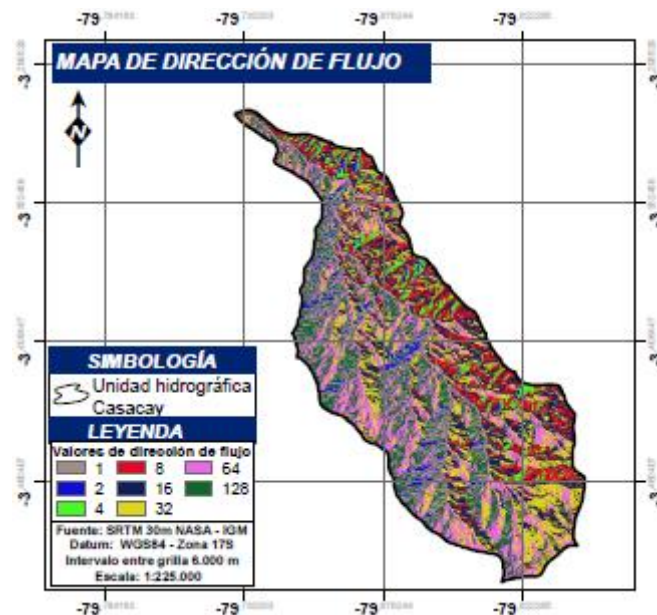


Figura 7. Dirección de flujo.

La dirección de flujo se generó a partir del MDE depurado, los valores de dirección varían de 1 a 128, y se asignan en función a la pendiente con respecto a las celdas vecinas.

Acumulación de flujo y cálculo del umbral: Esta fase arrojó como resultado el raster de acumulación de flujo, sobre el cual se realizó el procedimiento del cálculo del umbral, lo cual se muestra en la *Figura 8*.



Figura 8. Acumulación de flujo y cálculo del umbral.

El raster de acumulación de flujo se clasificó en dos clases. En la segunda clase se especificó el valor de 8,700, el cual se estableció como el umbral de acumulación permitiendo identificar el flujo del río principal y de sus cuatro aportantes.

Red de drenajes: Se obtuvo el raster de red de drenajes que identifica el curso principal del río, y los cuatro aportantes principales que definen a las unidades hidrográficas tipo cuenca, los cuales se enumeran con dígitos pares en la Figura 9.

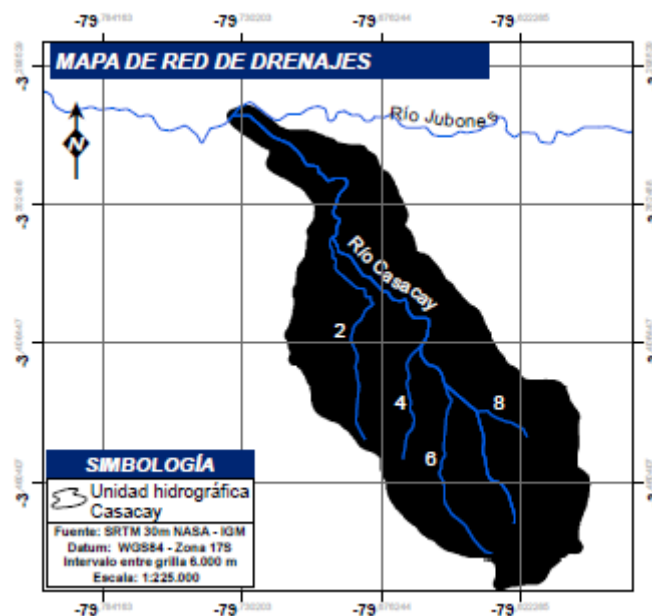


Figura 9. Mapa red de drenajes.

Además, la red de drenajes determina las 5 unidades hidrográficas tipo intercuenca. A los segmentos correspondientes a las nueve unidades hidrográficas, el proceso automático les asigna un único código.

Generación de cuencas: El resultado de esta etapa es la delimitación o generación automática del archivo ráster de las 9 unidades hidrográficas, las cuales se muestran en la *Figura 10*.



Figura 10. Mapa de generación de cuencas.

Para la generación de las cuencas, se necesitó de la dirección de flujo y la red de drenajes anteriormente obtenidos.

Vectorización y codificación: Con la vectorización de las cuencas se obtuvo el archivo digital en formato ESRI shapefile datum WGS84 UTM zona 17 Sur, el cual contiene las 9 microcuencas delimitadas, correspondientes a la unidad hidrográfica del río Casacay. Se estableció además la codificación para cada una de las microcuencas.

Para la presentación de los resultados, las microcuencas pasan a denominarse unidades hidrográficas en nivel 6 conforme los lineamientos del método Pfafstetter, lo cual se puede apreciar en la *Figura 11*.

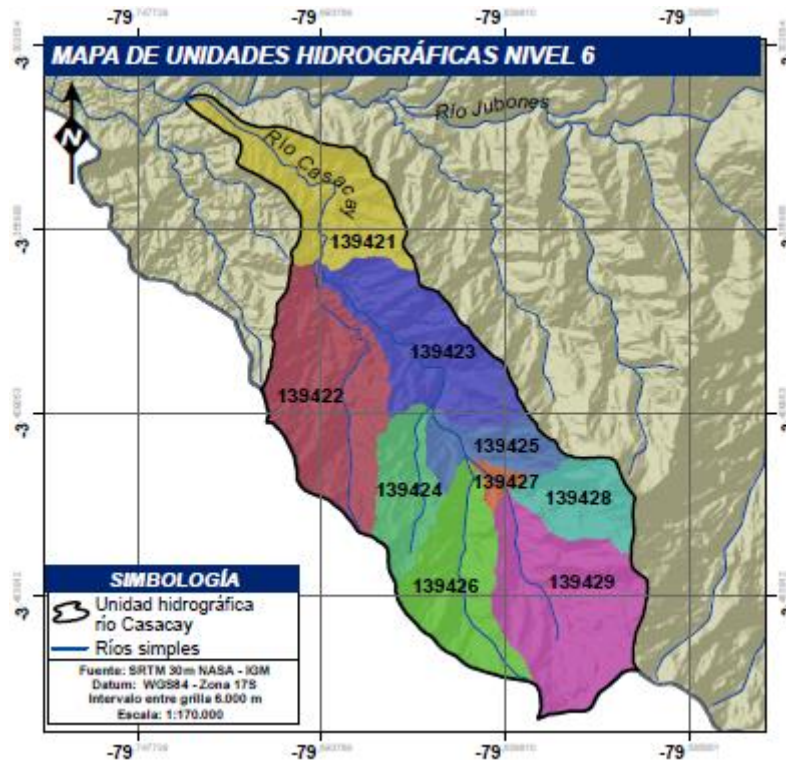


Figura 11. Mapa de unidades hidrográficas delimitadas nivel 6.

Los atributos establecidos en el archivo shapefile, para los 9 polígonos de las unidades de drenaje delimitadas, se pueden observar en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Atributos de las unidades hidrográficas delimitadas.

Cuenca	Nivel 6	Nombre 6	Tipo	Área km ²	Área Ha.
Unidad hidrográfica río Casacay (Código nivel 5: 13942)	139421	Unidad hidrográfica 139421	Intercuenca	16.54	1,654.24
	139422	Unidad hidrográfica 139422	Cuenca	22.90	2,290.32
	139423	Unidad hidrográfica 139423	Intercuenca	18.29	1,829.69
	139424	Unidad hidrográfica 139424	Cuenca	8.65	865.99
	139425	Unidad hidrográfica 139425	Intercuenca	6.83	683.65
	139426	Unidad hidrográfica 139426	Cuenca	15.02	1,502.21
	139427	Unidad hidrográfica 139427	Intercuenca	1.36	136.10
	139428	Unidad hidrográfica 139428	Cuenca	8.26	826.54
	139429	Unidad hidrográfica 139429	Intercuenca	23.73	2,373.45

Como se puede apreciar en la *Tabla 2*, la codificación del nivel 6 se obtuvo a partir del código nivel 5, establecido para la unidad hidrográfica del río Casacay. El número de dígitos del código permite identificar el nivel de delimitación actual y conforme las directrices de la metodología se definieron las 4 unidades tipo cuenca y las 5 intercuenas.

Los resultados de esta investigación, se integran adecuadamente a la información de cuencas hidrográficas oficializada por la Secretaría del Agua aplicando el método Pfafstetter. La topografía del terreno favoreció la delimitación de las unidades hidrográficas en nivel 6, permitiendo obtener las áreas de captación, que por su tamaño y detalle favorecen el análisis de la distribución espacial de las comunidades, usuarios del agua y fuentes hídricas.

La subdivisión de la unidad hidrográfica del río Casacay, favorece la planificación y el trabajo de campo, de forma concreta se puede analizar la oferta hídrica estableciendo como punto de descarga la desembocadura de cada unidad hidrográfica en nivel 6.

En los trabajos desarrollados por la UICN (2009a) no se incrementaron los niveles de delimitación, debido a que la resolución del MDE no era favorable para continuar subdividiendo el nivel 5, sin embargo las bases definidas en ese estudio, así como las del manual elaborado por la UICN (2009b), aportaron significativamente a la consecución del nivel 6 de unidades hidrográficas. En el estudio realizado por Ramírez et al. (2011), la base del proceso fue el SRTM de 90 metros, siendo necesario re proyectarlo a un MDE de 30 metros de resolución para cumplir con el propósito de la investigación.

Con los datos SRTM de 30 metros de resolución espacial liberados por la NASA en el año 2014, la delimitación de cuencas, subcuencas y microcuencas; es factible, necesiéndose corregir únicamente la presencia de errores de fuente.

La propuesta desarrollada por el CNRH (2002), arrojó como resultado las cuencas y subcuencas del Ecuador, sin embargo el método con el cual se realizó el proceso de delimitación, obedecía a los requerimientos planteados a nivel de país y a la cartografía base disponible localmente.

4. Conclusiones y Recomendaciones

A nivel de país se carece de información geográfica de unidades hidrográficas en nivel 6, con los resultados del presente trabajo se solucionó ese requerimiento para subcuenca del río Casacay. Los factores por los cuales se eligió la metodología Pfafstetter, fueron los diversos estudios desarrollados en diferentes países de Sudamérica, sustentándose también en la oficialización del uso del método para el Ecuador por parte de la Secretaría del Agua. Con la metodología se utilizaron los datos altimétricos del MDE de 30 metros de resolución espacial y la cartografía validada de cuencas hidrográficas disponible de forma oficial hasta el nivel 5; la cual fue delimitada en base al MDE de 90 metros de resolución.

Los datos del MDE de 30 metros de resolución espacial liberados en el año 2014, presentan errores o celdas vacías en la parte alta de la cuenca del río Casacay, siendo necesario la utilización del álgebra de mapas y estadísticas focales para el proceso de optimización, el cual consistió en llenar los vacíos con valores interpolados considerando un radio de acción de 10 celdas, este último valor puede variar dependiendo del tamaño de la zona a corregir. Fue importante la optimización del MDE, puesto que se utilizó en cada una de las etapas de la metodología.

Con la utilización del MDE de la NASA, se omite en la delimitación de microcuencas el proceso para la generación de un MDE, a partir de la cartografía de curvas de nivel, la cual necesita de una revisión minuciosa para corregir los errores topológicos.

El procedimiento automático para la generación de unidades hidrográficas en nivel 6, fue asistido por la herramienta *Hydrology*, arrojando resultados satisfactorios en cada fase. Para el establecimiento de las áreas de drenaje o captación, fue fundamental el cálculo del umbral de acumulación de la cuenca, ya que permitió identificar el curso del río principal y sus aportantes, contribuyendo a la identificación y obtención de las 9 unidades hidrográficas, equivalentes a la denominación de microcuencas.

La codificación de las unidades de drenaje delimitadas se basó en el código 13942, establecido para la unidad hidrográfica nivel 5 del río Casacay. Las unidades hidrográficas codificadas fueron: 139421, 139422, 139423, 139424, 139425, 139426, 139427, 139428 y 139429, las cuales corresponden al nivel 6 de acuerdo a los lineamientos definidos por el método aplicado.

Los resultados obtenidos fueron almacenados en un archivo shapefile datum WGS84 UTM zona 17 Sur, con el cual se actualiza la información geográfica de cuencas a mayor detalle y se beneficia a la gestión integral de los recursos hídricos, por lo tanto se cumple el objetivo planteado en esta investigación y se acepta la hipótesis formulada. Las microcuencas permiten continuar con la estandarización de unidades hidrográficas definida hasta el nivel 5 por la Secretaría del Agua.

Es factible desarrollar el proceso de delimitación en nivel 6, para el resto de unidades hidrográficas oficializadas hasta el nivel 5 según el método Pfafstetter, sin embargo es importante que el organismo rector del agua conozca los resultados del estudio realizado, y los que puedan emprenderse para otras cuencas hidrográficas.

La cartografía actualizada debe utilizarse para resolver otros requerimientos en la unidad hidrográfica del río Casacay, pero esencialmente valorar mediante un estudio la ocupación humana del territorio, el uso de la tierra actual y la tendencia de cambio. Las microcuencas obtenidas permiten la formulación de nuevos proyectos, orientados a la conservación de las fuentes hídricas que abastecen de agua a los cantones de El Guabo, Machala y Pasaje.

Los resultados son valiosos para la gestión operativa y de alto nivel de la Secretaría del Agua - DHJ, esencialmente fortalecen el Plan Nacional de Recursos Hídricos y al proyecto emblemático de la institución denominado Inventario Participativo de Recursos Hídricos de la unidad hidrográfica del río Casacay, los cuales enfocan sus investigaciones a nivel de microcuencas. Con los datos de las unidades hidrográficas en nivel 6, se actualiza el banco de datos del sistema de autorizaciones de usos de agua y del inventario participativo.

Bibliografía

- Alves, T., Oliveira, P., Rodrigues, D., & Ayres, F. (2010). Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. *SciELO*, 30(1), 46-57.
- Asamblea Nacional. (2014). Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua. *Registro Oficial*, 32.
- Casillas, M. (2006). Programa Nacional de Microcuencas: Una Estrategia de Desarrollo Integral. El manejo integrado de cuencas en México. Estudios y reflexiones para reorientar la política ambiental. *SEMARNAT-INE*, 259-275.
- CNRH, Consejo Nacional de Recursos Hídricos. (2002). Memoria Técnica: División Hidrográfica del Ecuador, Propuesta del CNRH y el Grupo Interinstitucional para oficializar en el Ministerio de Relaciones Exteriores.
- ESRI, E. S. (11 de 9 de 2013). *ArcGIS Resources*. Recuperado el 26 de 08 de 2015, de <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#/na/009z00000062000000/>
- ESRI, Environmental Systems Research Institute. (07 de 11 de 2012). *ArcGIS Resources*. Recuperado el 10 de 09 de 2015, de <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/009z00000068000000>
- ESRI, Environmental Systems Research Institute. (09 de 11 de 2013). *ArcGIS Resources*. Recuperado el 20 de 8 de 2015, de <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#/na/009z00000063000000/>
- Galvão, W. S., & Meneses, P. R. (2005). Avaliação dos sistemas de classificação e codificação das bacias hidrográficas brasileiras para fins de planejamento de redes hidrométricas. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)*, 12, 2511-2518.
- Gomes, C., Cunha, A., dos Santos, A., Alvés, N., de Andrade, E., Simplicio, B., & de Oliveira, A. (2007). Comparação do uso do SRTM para delimitação e caracterização fisiográfica de uma micro-bacia hidrográfica. 21-26.
- Gomes, J., & Barros, R. (2011). A importância das Ottobacias para gestão de recursos hídricos. *Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto*, 15, 1287-1294.

- Gomes, T., & Lobão, J. (2009). Delimitação de sub-bacias a partir do uso de imagem SRTM/NASA: um estudo da Bacia do Rio Jacuípe-BA. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)*, 3841-3848.
- Guevara, J. (1987). Guía para la implementación de un Sistema de Información Geográfica para la planificación regional y nacional. In I Conferencia latinoamericana sobre informática en Geografía. pp. 301-322.
- Johnson, L. E. (2008). Geographic information systems in water resources engineering. *CRC Press*.
- Medeiros, L. C., Ferreira, N. C., & Ferreira, L. G. (2009). Avaliação de modelos digitais de elevação para delimitação automática de bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Cartografia*, 137-151.
- Pfafstetter, O. (1989). *Classificação de Bacias Hidrográficas – Metodologia de Codificação*. Rio de Janeiro, RJ: Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS). Manuscrito não publicado.
- Pires, C., & Faria, S. (2013). Construção da base Otto-codificada em Minas Gerais: implementação da metodologia desenvolvida por Otto Pfafstetter (1989) para escalas 1:100.000 e 1:50.000. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*.
- Pontes, E., Linhares, M., & Santos, W. (2009). Delimitação das bacias hidrográficas da Ilha do Maranhão a partir de dados SRTM. *INPE*, 4631-4638.
- Ramírez, A., Castillo, J., & Gonzalez, J. (2011). Delimitación, codificación de las cuencas hidrográficas según los métodos de Pfafstetter y Strahler utilizando Modelos de Elevación Digital y técnicas de Teledetección. *XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR - INPE*, 1105-1112.
- Secretaría del Agua. (2011). *Resolución 2011-245*.
- Secretaría del Ambiente. (2011). *Criterios técnicos de delimitación y codificación de cuencas, caso específico Región Oriental del Paraguay*. Asunción: Dirección General de Protección y Conservación de los Recursos Hídricos.
- UICN Sur, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza; SGCAN, Secretaría General de la Comunidad Andina de Naciones. (2010). *Manual de procedimientos de*

delimitación y codificación de unidades hidrográficas. Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Bolivia.

UICN, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (2009a). *Delimitación y codificación de Unidades Hidrográficas del Ecuador Escala 1:250000 Nivel 5*.

UICN, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (2009b). *Manual de procedimientos de delimitación y codificación de Unidades Hidrográficas. Caso: Ecuador*. Quito.

Venkatachalam, P., Mohan, B., Kotwal, A., Mishra, V., Muthuramakrishnan, V., & Pandya, M. (2001). Automatic delineation of watersheds for hydrological applications. 5, 9.

Walchholz, C., Bazílio, S., Costa, S., & Mercante, E. (2013). Delimitação automática da microbacia hidrográfica do Rio das Lontras, através de dados SRTM. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil*.