



HAL
open science

Geo-PUMMA: representación espacial de cuencas urbanas y periurbanas. Caso de aplicación en Estero Los Guidos, Lo Barnechea

P. Sanzana, J. Gironas, Isabelle Braud, F. Branger, F. Rodriguez, X. Vargas,
N. Hitschfled, Munoz J F, S. Vicuna

► To cite this version:

P. Sanzana, J. Gironas, Isabelle Braud, F. Branger, F. Rodriguez, et al.. Geo-PUMMA: representación espacial de cuencas urbanas y periurbanas. Caso de aplicación en Estero Los Guidos, Lo Barnechea. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Oct 2015, Santiago, Chile. 14 p. hal-01253899

HAL Id: hal-01253899

<https://hal.science/hal-01253899>

Submitted on 11 Jan 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

GEO-PUMMA: REPRESENTACIÓN ESPACIAL DE CUENCAS URBANAS Y PERIURBANAS. CASO DE APLICACIÓN EN ESTERO EL GUINDO, LO BARNECHEA

PEDRO SANZANA^{1,2,3}, JORGE GIRONÁS^{2,3}
ISABELLE BRAUD¹, FLORA BRANGER¹
FABRICE RODRIGUEZ⁴, XIMENA VARGAS⁵
NANCY HITSCHFELD⁶, JOSE FRANCISCO MUÑOZ²
SEBASTIAN VICUÑA^{2,7}

RESUMEN

El crecimiento urbano introduce elementos artificiales como canales, tuberías, calles y obras de arte que modifican la conectividad de los sistemas de drenaje. El objetivo principal de este trabajo es modelar espacialmente cuencas urbanas y periurbanas a pequeña escala (1-10 km²) y extraer una red de drenaje representativa de la conexión hidráulica considerando la conectividad de elementos canalizadas y no encauzados. Para ello se propone el uso de Geo-PUMMA, un conjunto de rutinas Python para GRASS y QGIS, basado en mallas vectoriales que se generan a partir de información espacial como mapas catastrales, tipos de suelos, geología y modelos digitales de elevación, entre otros. Geo-PUMMA utiliza el concepto de Unidades Respuesta Hidrológica (URH) y Elementos Hidrológicos Urbanos (EHU). La aplicación de funciones hidrogeomorfológicas, tales como la función de ancho y la función de área, permitieron concluir que al utilizar Geo-PUMMA es posible mejorar la representación de la red de drenaje en las escalas de 100~400 m para el caso del Estero El Guindo, Lo Barnechea.

¹ Irstea, UR HHLY, Hydrology-Hydraulics. ppsanzana@uc.cl

² DIHA, Pontificia Universidad Católica de Chile.

³ Centro de Desarrollo Urbano Sustentable CONICYT/FONDAP/15110020.

⁴ LUNAM Université, IFSTTAR, IRSTV.

⁵ DIC, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

⁶ DCC, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

⁷ Centro Interdisciplinario de Cambio Global, Pontificia Universidad Católica de Chile.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio de áreas rurales en paisajes urbanos ha traído consigo una serie de problemas asociados a la gestión de los recursos hídricos (Xiao et al., 2007) y riesgo de desastres naturales de carácter hidrometeorológico. Dentro de los principales problemas destacan el aumento de caudales máximos (Smith et al., 2001), construcción sobre planicies de inundación, disminución de la infiltración y recarga hacia los acuíferos (WMO, 2008), cambios en el flujo base y la curva de duración (Mejía et al., 2014), y el deterioro en la calidad del agua debido al aumento de contaminantes de origen urbano (Lafont et al., 2006). También se inducen demandas de riego urbano de parques y jardines cambiando especies nativas por nuevas especies ornamentales que conforman el paisaje urbano (De la Barrera, 2010; Reyes-Paecke y Meza 2011). Este proceso también ha dado origen a las cuencas periurbanas, que se caracterizan por un alto grado de heterogeneidad, mezcla de áreas naturales, rurales y zonas urbanas (Santo Domingo et al., 2010) consideradas especialmente vulnerables (Braud et al., 2013). En este tipo de cuencas existen elementos propios del proceso de urbanización que modifican la red de drenaje natural y la dirección de los flujos superficiales y subsuperficiales.

El objetivo principal de este trabajo es modelar espacialmente cuencas urbanas y periurbanas a pequeña escala (1-10 km²) y extraer una red de drenaje lo más representativa posible de la conexión hidráulica considerando la conectividad hidrológica tanto de elementos canalizadas como aquellos no encauzados mediante una nueva herramienta llamada Geo-PUMMA. También se propone una metodología basada en un enfoque que considere de manera explícita la infraestructura artificial y natural, de tal forma que permita realizar todos los pasos para generar la información básica necesaria de modelos hidrológicos distribuidos. Por último se muestra un caso de aplicación y análisis espectral de la red de drenaje que permite estimar la escala en la que es posible apreciar las mejoras de la representación.

Geo-PUMMA corresponde a una herramienta de modelación espacial de enfoque vectorial que permite preservar las principales unidades fisiográficas propias de cuencas urbanas y periurbanas. Todos los elementos son representados por polígonos de forma irregular y escala variable, por lo que es posible considerar en forma explícita la infraestructura propia de este tipo de ambientes complejos (obras de arte, dispositivos de regulación, acueductos, tuberías y calles o avenidas, entre otros). La representación de la zona urbana se basa en la definición de Elementos Hidrológicos Urbanos (EHU) (Rodríguez et al., 2008), mientras que la zona rural y periurbana se caracteriza utilizando Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) (Flügel, 1995). Esta herramienta SIG permite generar mallas y bases de datos útiles para modelos hidrológicos distribuidos y semi-distribuidos. El enfoque utilizado en este toolbox es similar al presentado por Geo-MHYDAS (Lagacherie et al., 2010) que fue desarrollado para representar zonas agrícolas.

2. DISCRETIZACIÓN DE LA CUENCA Y OBTENCIÓN DE LA RED DE DRENAJE UTILIZACION GEO-PUMMA

Geo-PUMMA consolida y sintetiza trabajos de investigación orientados a generar bases de datos y archivos de entrada para el modelo hidrológico PUMMA (Jankowsky et al., 2014).

Los principales trabajos considerados para el desarrollo de Geo-PUMMA corresponden a los desarrollados por Paillé (2010), Bossard (2011), Jankowsky (2011), Sanzana et al. (2013) y Villalobos (2014). La consolidación de estos trabajos se llevó a cabo en la plataforma GRASS (GRASS Development Team, 2012) y QGIS (Quantum GIS Development Team 2015) utilizando el lenguaje de programación Python (python.org), dado las ventajas de manejo topológico y comandos existentes que permiten un manejo de mallas vectoriales. En la Tabla 1 se describen en detalle las tareas y rutinas, considerando las diferentes etapas del proceso de análisis espacial. Dado que la modelación espacial en detalle se compone de una cantidad de pasos importantes se propone una metodología que ayuda a llevar a cabo el procesamiento espacial de las URH y de los EHU considerando desde la etapa inicial de recolección y digitalización de datos hasta la etapa última de conectividad hidrológica. Para el desarrollo completo de esta metodología también es necesario la utilización de comandos básicos de GRASS 6.4.4 y Geo-MHYDAS, por lo que se recomienda la instalación de estas versiones como paso previo a la utilización de Geo-PUMMA.

Etapa A: Recopilación y Digitalización de Mapas

En esta etapa se considera la recopilación de toda la información espacial relevante en la zona urbana y natural. En la Figura 1 se muestra un resumen de los pasos descritos para la Etapa A. En la zona urbanizada (Paso A.1 zona urbana) se debe recopilar la información de mapas catastrales, en la que se debe considerar la digitalización de la zona construida en caso de no estar disponible. También se debe digitalizar la zona pública construida, entre ellos calles, plazas, parques, estadios, senderos, obras de regulación y aquellas obras de importancia.

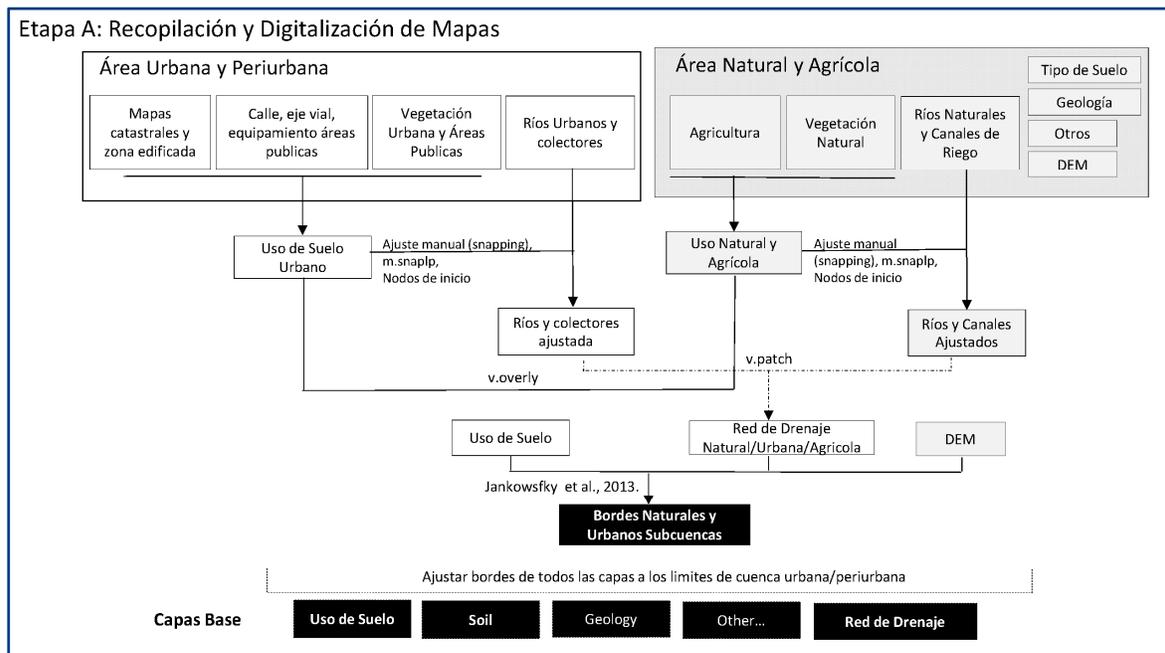


Figura 1. Digitalización y preparación de información base

Tabla 1. Tareas y rutinas abordadas en Geo-PUMMA.

	Rutina o Plugin	Tarea	Software
Etapa A	<i>p.A1.clean_topology.py</i>	Limpieza topológica de polígonos	GRASS 6.4
	<i>p.A2.clean_polyline.py</i>	Ajuste y quiebre de capas polilíneas	GRASS 6.4
Etapa B.1: Generación y Caracterización de los EHU	<i>p.B1.trottoir.py</i>	Selecciona parte de la vereda y calle que se ubica frente a cada lote urbano	GRASS 6.4
	<i>p.B2.uhe.py</i>	Generación de Elementos Hidrológicos Urbanos	GRASS 6.4
	<i>p.B3.a.hauteur_moyenne.py</i>	Calcula la altura media de cada EHU	GRASS 6.4
	<i>p.B3.c surfaces_boisees.py</i>	Calcula el porcentaje de árboles y arbustos al interior de cada EHU	GRASS 6.4
	<i>p.B4.length.py</i>	Calcula distancia desde el centro de gravedad hasta el punto de drenaje	GRASS 6.4
	<i>p.B5.baty.py</i>	Calcula el porcentaje de edificación de cada EHU	GRASS 6.4
Etapa B.2: Mejoramiento y Caracterización de las URH	<i>p.B6.polygons_holes.py</i>	Segmenta las URH con agujeros al interior	GRASS 6.4
	<i>p.B7.shape_factors.py</i>	Calcula indicadores geométricos clásicos (convexidad, solidez, factor de forma y compacidad)	GRASS 6.4
	<i>Triangle Plugin</i>	Segmenta las URH mal formadas mediante el uso de librerías Meshpy y el Software Triangle	QGIS 2.6
	<i>p.B8.a.convexity.py</i>	Disuelve mediante criterio de convexidad, recomendado para URH altamente no convexas	GRASS 6.4
	<i>p.B8.b.formfactor.py</i>	Disuelve mediante criterio de factor de forma, recomendado para polígonos delgados y alargados como calles y grandes avenidas	GRASS 6.4
	<i>p.B9.raster_segmentation.py</i>	Segmenta unidades que posean propiedades con una alta variabilidad espacial	GRASS 6.4
Etapa B.3: Conectividad Hidrológica	<i>p.B10.all_interfaces.py</i>	Identifica todas la interfaces que comparten todos los elementos	GRASS 6.4
	<i>p.B11.river_segm.py</i>	Segmenta el río considerando las interfaces existentes	GRASS 6.4
	<i>p.B12.wtri.py</i>	Identifica aquellas interfaces de intercambio entre URH/UHE y el río entre los que puede existir intercambio de flujo	GRASS 6.4
	<i>p.B13.wti.py</i>	Identifica aquellas interfaces de intercambio subterráneo entre URH y UHE	GRASS 6.4
	<i>p.B14.olaf.py</i>	Realiza el rastreo superficial de cada unidad hasta llegar al río a través de los elementos de menor altura	GRASS 6.4
	<i>p.B15.geo_descriptors.py</i>	Actualiza la base de datos de la red de drenaje, considerando área acumulada y distancia hacia el punto de salida	GRASS 6.4
	<i>p.B16.river_direction.py</i>	Preserva la dirección del río, considerando orientación aguas arriba o aguas abajo del punto de salida	GRASS 6.4
	<i>p.B17.rebuild_ditch_segments.py</i>	Disuelve segmentos del río con iguales características	GRASS 6.4
	<i>p.B18.river_h_s.py</i>	Calcula la altura y pendiente de cada segmento de río	GRASS 6.4

Los modelos de elevación digital deben ser de alta resolución, considerando como aceptables aquellos que posean un ancho de celda no mayor a 2 m. En el caso de contar con curvas de nivel en lo óptimo escala 1: 2.500 con curvas cada 1 m o bien escala 1: 5.000 con curvas cada 2,5 m como máximo. Esto debido a que al momento de obtener propiedades homogéneas, como altura, pendiente, aspecto o índice topográfico la calidad estará directamente relacionada con la resolución de la fuente de información.

El siguiente paso corresponde a delimitar los bordes de la cuenca y subcuencas. Para ello Jankowfsky et al. (2013) presenta una metodología que permite disminuir el trabajo manual, considerando diferentes fuentes de información y herramientas semiautomáticas. El trabajo de campo en este punto es primordial, con tal de identificar en terreno aquellas divisorias de agua propias del terreno en estudio, ya que en el caso de cuencas complejas no necesariamente los bordes corresponden a las divisorias delimitadas por la topografía.

Una vez que se han identificado los bordes de la cuenca se debe imponer este límite al resto de los mapas de entrada (uso de suelo, subcuencas, suelo y geología entre otros). El límite de cada uno de los mapas debe coincidir exactamente con el de la cuenca en estudio, debido a que en los pasos posteriores se realizara la intersección entre todos los mapas.

Etapa B.1: Generación y Caracterización de los EHU

Para procesar la zona urbana se extraen los loteos urbanizados, parcelas y las calles a partir de la capa de uso de suelo. En la Figura 2, se muestra la Etapa B.1. Los loteos y las parcelas deben tener digitalizado en su interior toda la infraestructura edificada y se les debe asignar un número identificador (ID) por lote, generando un mapa catastral. A partir de la capa de calles urbanizadas se debe digitalizar una polilínea que represente el centro de cada calle. La línea del centro de las calles puede ser digitalizada manualmente.

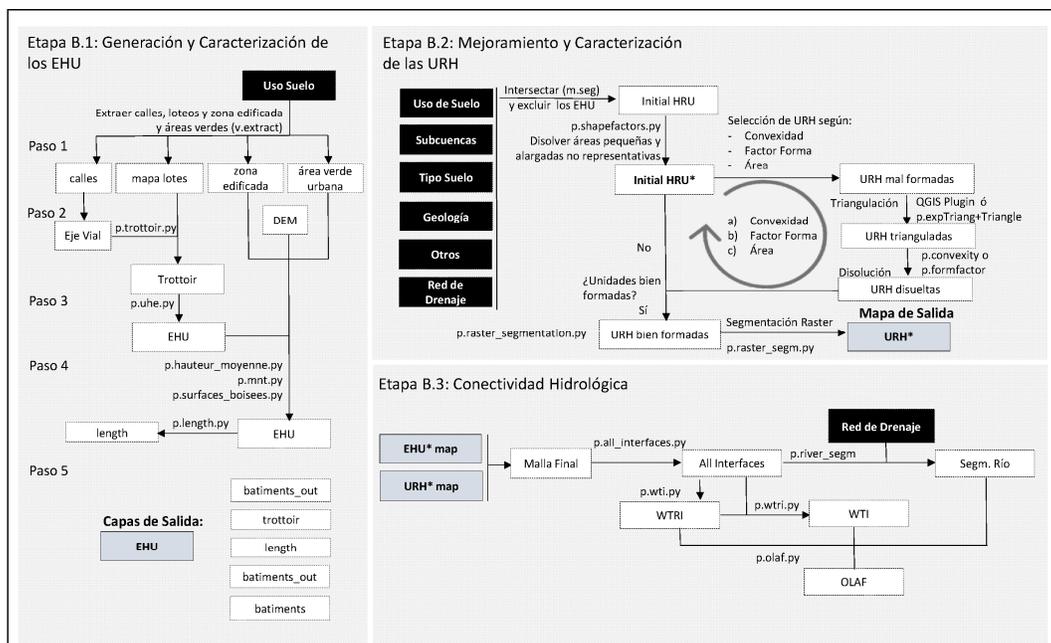


Figura 2. Procesamiento de EHU, HRU y conectividad hidrológica.

Etapa B.2: Mejoramiento y Caracterización de las URH

El primer paso para obtener las URH iniciales corresponde a la intersección de las diferentes capas vectoriales. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de la generación inicial de las URH, de la que se debe extraer todas las EHU. Generalmente las herramientas que permiten la intersección de capas en las plataformas SIG solamente permiten intersectar capas polígonos con polígonos y no permiten intersectar polígonos con polilíneas. Dado que en este caso se requiere intersectar capas representadas por polígonos (uso de suelo, subcuencas, suelo y geología entre otros) y polilíneas (ríos, canales, etc), se recomienda el uso del comando *m.seg* desarrollada por Lagacherie et al. (2010).

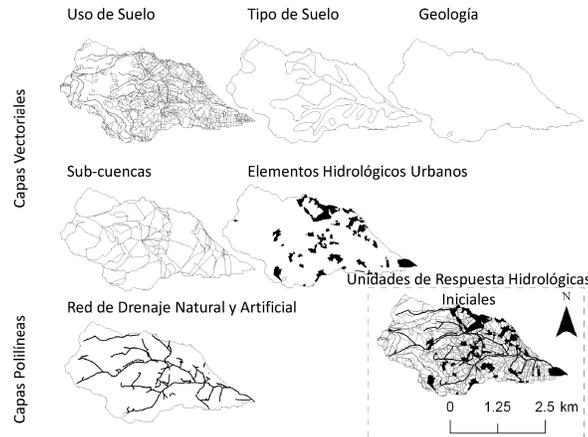


Figura 3. Intersección de capas base para la generación de las HRU iniciales

La directa intersección de mapas permite identificar aquellas zonas con propiedades homogéneas, sin embargo esta malla inicial se compone de elementos de geometría muy irregular que no permiten obtener una conectividad hidrológica representativa tal como se muestra en el trabajo presentado por Sanzana et al. (2013). Es por ello que se impone que la malla de modelación debe estar compuesta por elementos bien-formados que cumplan requisitos geométricos que faciliten la conexión hidrológica entre todos sus elementos (Sanzana et al., 2013). Entre los requerimientos principales se pueden mencionar: el centro de gravedad debe estar al interior de cada elemento, el perímetro debe estar representados por contornos suaves y no por ángulos rectos, el tamaño de cada elemento debe estar limitado con un mínimo y un máximo de área, y evitar la existencia de elementos delgados y alargados.

Etapa B.3: Conectividad Hidrológica

Una vez que se cuenta con la malla mejorada se procede a aplicar los algoritmos de rastreo considerando aquellas áreas que están conectadas directamente a la red de drenaje así como aquellas que no. En la Figura 2 se muestra la Etapa B.3. El algoritmo de rastreo *p.olaf.py* se basa en el trabajo presentado por Bossard (2011). El algoritmo implementado conecta en un primer momento todas las URH vecinas al río y todas las URH que poseen un solo vecino. Luego para el resto de las URH busca el camino de altura mínima hasta llegar al tramo de río o canal. En caso de generar un bucle el algoritmo regresa hasta el inicio del bucle y busca un camino alternativo, de esta manera actúa en forma recursiva hasta encontrar una

conexión con la red de drenaje. Dado que la división de subcuencas se entrega en un paso intermedio, la búsqueda solo se realiza al interior de cada subcuencas y evita los saltos a cuencas vecinas, de esta manera respeta siempre los límites topográficos impuestos de manera previa.

3. CASO DE ESTUDIO Y METODO DE EVALUACIÓN DE MEJORAS DE GEO-PUMMA

La cuenca periurbana del Estero El Guindo ($6,5 \text{ km}^2$) se ubica en la comuna de Lo Barnechea, en la zona del piedemonte de Santiago. La zona natural se encuentra cubierta por matorral nativo ($3,3 \text{ km}^2$), de distribución densa en la zonas de quebrada o muy poco densa en gran parte de la cuenca. La zona urbana se considera bien consolidada ($3,2 \text{ km}^2$). Existe un uso predominantemente residencial, con edificaciones de baja densidad y con altos recursos en las zonas más nuevas de la comuna.

Descripción e Información Disponible

La capa de uso de suelo se generó en base a la información proporcionada por el SAF (Servicio Aéreo Fotogramétrico) en su vuelo SECTRA del año 2012 y el Plan Regulador Lo Barnechea (2012). La digitalización y clasificación de tipologías de uso de suelo fue llevada a cabo por Guzmán (2014) para el proyecto FONDECYT 1131131. La información de tipo de suelo se obtuvo de la recopilación del Plan Director Maipo. La capa de geología se obtuvo de información recopilada por estudios hidrogeológicos (DGA-AC, 2000). La información topográfica corresponde a curvas de nivel 1: 2.500 con curvas cada 1 m para la zona urbana y escala 1: 5.000 con curvas cada 2,5 m para la zona natural y de cordillera desarrollada por DOH-EIC, 2004. En la Figura 4 se muestra la dinámica de dirección de flujo superficial y subterráneo (a), la capa de uso de suelo (b).

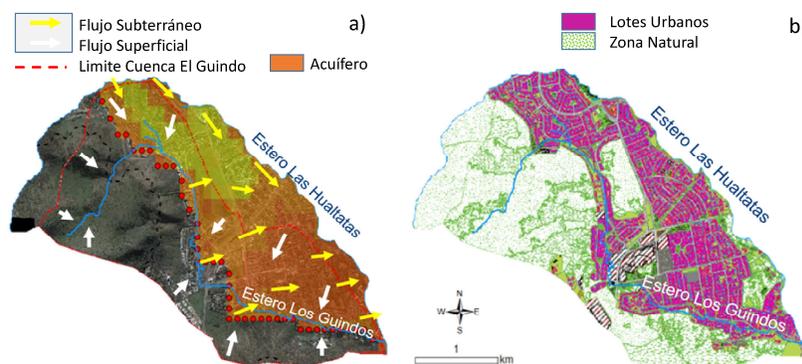


Figura 4. Dinámica de dirección de flujo superficial/subterráneo (a), y distribución de suelo urbano y natural (b) de la Cuenca Estero El Guindo, Lo Barnechea.

Mallas de modelación y Redes de Drenaje

Para comparar los cambios y mejoras que se producen en el proceso de segmentación de las URHs se definen tres casos: malla original, de referencia y recomendada. Para ello se

definen parámetros geométricos y topológicos que cumple cada malla según los siguientes criterios:

Malla Inicial: se define como malla inicial aquella que proviene directamente de la intersección de las capas base (uso de suelo, tipo de suelo, subcuencas y geología). Dado que la zona de estudio se ubica en una zona periurbana y la pendiente tiene un rol fundamental se decide incluir la capa de pendientes homogéneas como información base en el proceso de intersección.

Malla de Referencia: se define como malla de referencia aquella que cumple con parámetros geométricos altos. Considerando un Índice de Convexidad 0,975, Factor de Forma 0,50 y un área máxima de 0,2 ha. Esta malla asegura un alto grado de segmentación que representa de mejor manera la topografía y evita los problemas topológicos de conexión entre unidades vecinas.

Malla Recomendada: se define como malla recomendada aquella que cumple con parámetros geométricos aceptables y no incrementa enormemente la cantidad de URH. La idea es que al inducir la menor cantidad de segmentaciones se obtenga una conexión realista entre las unidades que componen la malla. Para ello se consideran como valores límites un Índice de Convexidad 0,75, Factor de Forma 0,20 y un área máxima de 2 ha.

Estrategia para comparar redes de drenaje

Para analizar y comparar las redes de drenaje de cada malla se utiliza la función de ancho y función de área. Estas funciones permiten comparar estructuras de drenaje (2D) en funciones matemáticas (1D). La función de ancho de una cuenca corresponde al número de links que existen a una determinada distancia a lo largo de la red de drenaje (Shreve, 1969; Rodríguez-Iturbe y Rinaldo, 1997). La función de área se define como la franja de área asociada considerando un delta de distancia aguas arriba y debajo de un punto determinado. De esta manera se define la función de ancho y área como:

$$W(x) = \sum_{i=1}^N n_i(x, d_{i\min}, d_{i\max}) \quad [1]$$

$$A(x) = \sum_{i=1}^N a_i(x, d_{i\min}, d_{i\max}) \quad [2]$$

Donde $W(x)$ y $A(x)$ corresponde al valor de la función de ancho y la función de área respectivamente, x representa la distancia a través de la red de drenaje hasta el punto de salida de la cuenca, n corresponde al total de segmentos ubicados a distancia x , a corresponde a la franja de área a una distancia x , $d_{i\min}$ y $d_{i\max}$ corresponden a la distancia aguas arriba y aguas abajo.

Análisis Espectral

El análisis espectral permite estudiar las diferencias en el dominio de las frecuencias, como forma alternativa de observar las diferencias entre las funciones a lo largo del cauce. En

Matlab existe la función CPSD (Cross Power Spectral Density) que es posible aplicar a diferentes conjuntos de funciones. De esta manera se pueden observar si las frecuencias a las que se observan las diferencias y su respectiva escala. Se utilizó CPSD entre los siguientes conjuntos: función de referencia consigo misma (Py0y0), función de referencia con respecto a función inicial (Py0y1) y función de referencia con respecto a la función recomendada (Py0y2).

4. RESULTADOS

La metodología de segmentación se aplicó a la Cuenca Estero El Guindo generando tres mallas de modelación: Malla Inicial, Malla Recomendada y Malla de Referencia, a cada una de ellas se extrajo la red de drenaje (Figura 5). La malla inicial, compuesta por 3190 elementos, presenta problemas en el rastreo del flujo, generando falsas áreas de depresión y zonas que quedan desconectadas. La malla de referencia, compuesta por 4585 elementos, permite una mejor conexión entre las URH y los EHU. La malla recomendada, compuesta por 3506 elementos, preserva una conexión hidrológica realista sin aumentar considerablemente el número de URH.

Información Relevante de Cada Malla de Modelación

En la Tabla 2 se muestran los principales parámetros estadísticos asociados a cada malla. Los principales parámetros señalados corresponden a los valores de área, índice de convexidad y factor de forma de todos los elementos, considerando en resumen todas las URH y los UHE del Estero El Guindo.

Tabla 2. Parámetros estadísticos de Malla Inicial (m.ini), Malla Recomendada (m.rec) y Malla de Referencia (m.ref).

Estadístico	$A_{m.ini}$ (m ²)	$A_{m.rec}$ (m ²)	$A_{m.ref}$ (m ²)	$CI_{m.ini}$	$CI_{m.rec}$	$CI_{m.ref}$	$FF_{m.ini}$	$FF_{m.rec}$	$FF_{m.ref}$
Promedio	2142	1862	1427	0,958	0,958	0,965	0,747	0,724	0,710
Mediana	923	896	830	0,998	0,998	0,998	0,836	0,817	0,762
Mínimo	10	10	10	0,328	0,400	0,401	0,041	0,092	0,070
Máximo	243133	63817	63817	1,000	1,00	1,00	1,152	1,152	1,152
Desviación	1342	4074	2456	0,098	0,090	0,078	0,243	0,246	0,210
Coef.Var.	4,3	2,2	1,7	0,102	0,094	0,081	0,326	0,340	0,290

Función de Área y Función de Ancho

En la Figura 6 se muestra la función de ancho y de área asociada a cada malla. La función de ancho de la malla inicial se diferencia de la malla de referencia principalmente entre los tramos 2000-2500 y 5500-7000, esto se debe a que las URH segmentadas corresponden principalmente a los tramos naturales provenientes de la zona de piedemonte. El cambio de la función de ancho producto de la segmentación de calles genera una diferencia menor entre ambas funciones, sin embargo la importancia de esta segmentación tiene como

objetivo evitar falsos obstáculos para el rastreo superficial. La función de ancho de la malla recomendada versus la malla de referencia no presenta grandes diferencias. La función de área de la malla inicial presenta variaciones marcadas con respecto a la función obtenida de la malla de referencia, este fenómeno se debe principalmente a que el bajo nivel de segmentación no permite obtener una función de área representativa. Los saltos irregulares que se observan en la función de área de la malla inicial se distancian cada 200 m-300 m aproximadamente. La función de área de la malla recomendada versus la malla de referencia se asemejan bastante, aunque presenta una variación menor y constante a lo largo de todo el cauce.

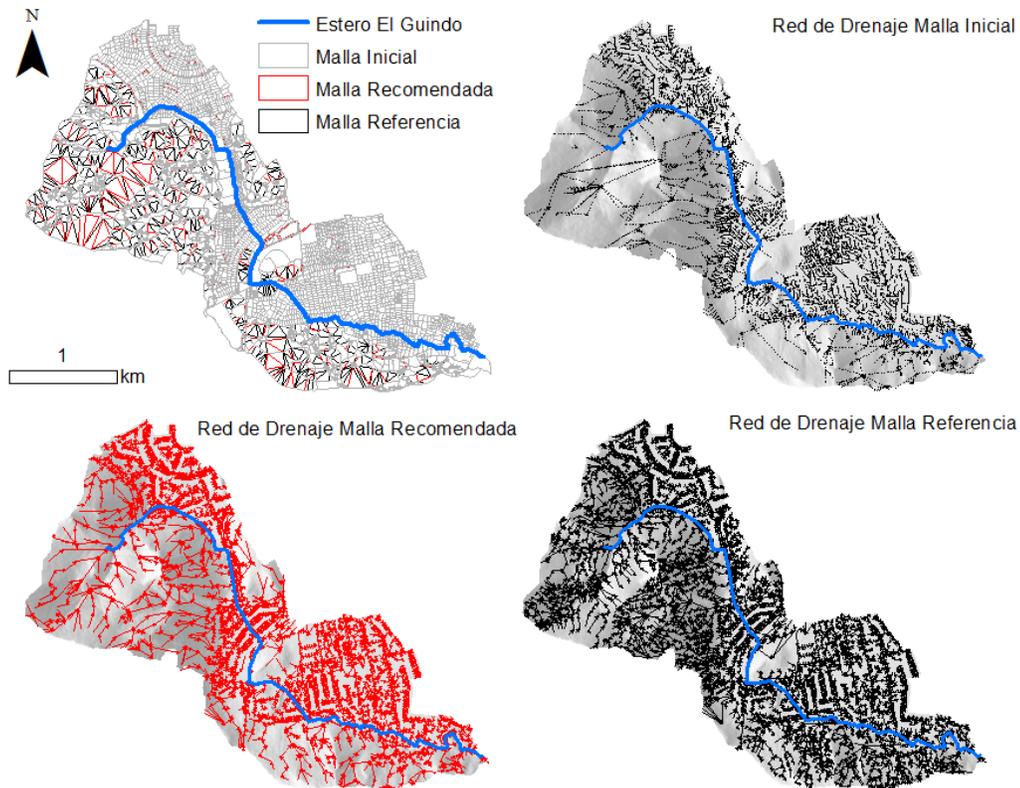


Figura 5. Mallas de Modelación Estero El Guindo y Redes de Drenaje Inicial (superior derecha), Recomendada (inferior izquierda) y Referencia (inferior derecha).

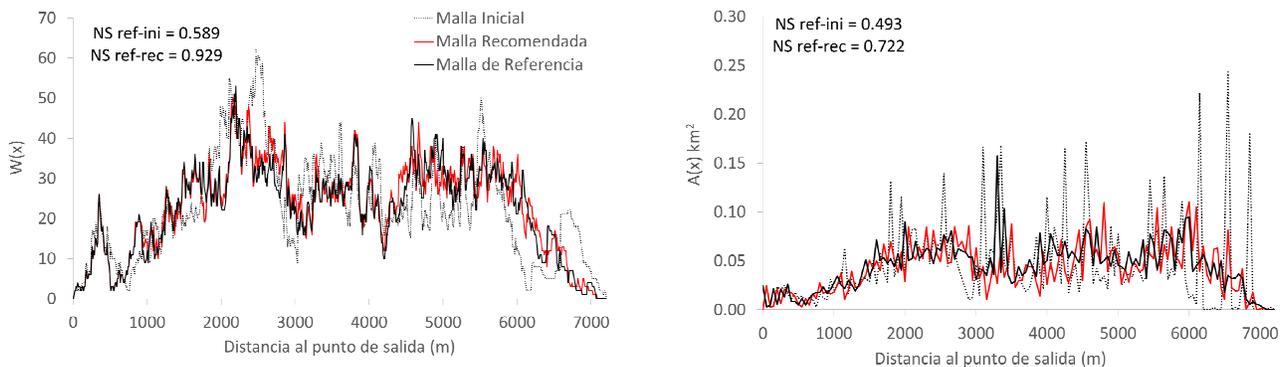


Figura 6. Funciones de Ancho y de Área de las mallas inicial (línea gris punteada), recomendada (línea roja continua) y de referencia (línea negra continua)

Análisis Espectral e Indicadores de Bondad de Ajuste

En la Figura 7 se muestra el Cross-Spectrum de las funciones de área y de ancho. Las mayores diferencias entre las funciones de ancho inicial y de referencia se observan a partir de frecuencias altas, asociadas a escalas del orden de 500 m, mientras que el CPSD de las funciones de ancho de la mallas recomendadas y de referencia se observan relativamente similar, sin grandes diferencias. En el caso del CPSD de las funciones de área de las mallas inicial y de referencia se observa que las mayores diferencias se aprecian entre las escalas de los 100 m- 300 m, esto se debe principalmente a que en la función de ancho inicial se observan saltos irregulares que desaparecen en la función proveniente de la malla de referencia. El CPSD de la función de área recomendada y de referencia no muestra grandes diferencias sin embargo a frecuencias bajas presenta oscilaciones que se corresponden con las pequeñas variaciones observadas en la función de área. Por otro lado, se utilizó el indicador de Nash–Sutcliffe (NS) considerando la malla de referencia como el caso base para comparar las diferencias entre las funciones obtenidas. Para el caso de las funciones de ancho se aplicó el coeficiente de NS directamente, mientras que para comparar las funciones CPSD se aplicó al logaritmo de los datos, dado que las diferencias se concentran en las frecuencias altas asociados a escalas medias y pequeñas. En las Figuras 6 y 7 se muestran los valores obtenidos. La función de ancho de la malla inicial versus la de referencia muestra un ajuste de 0.589, mientras que la función de ancho de la malla recomendada versus la de referencia muestra un ajuste de 0.929. En el dominio de las frecuencias también se observa una mejora del ajuste desde 0.726 a 0.953 para el caso de la función de ancho. La función de área inicial versus la de referencia muestra un ajuste de 0.493, mientras que la función de área de la malla recomendada versus la de referencia muestra un ajuste de 0.722. En el caso del dominio de las frecuencias se observa una mejora del ajuste desde 0.542 a 0.786 para el caso de la función de área.

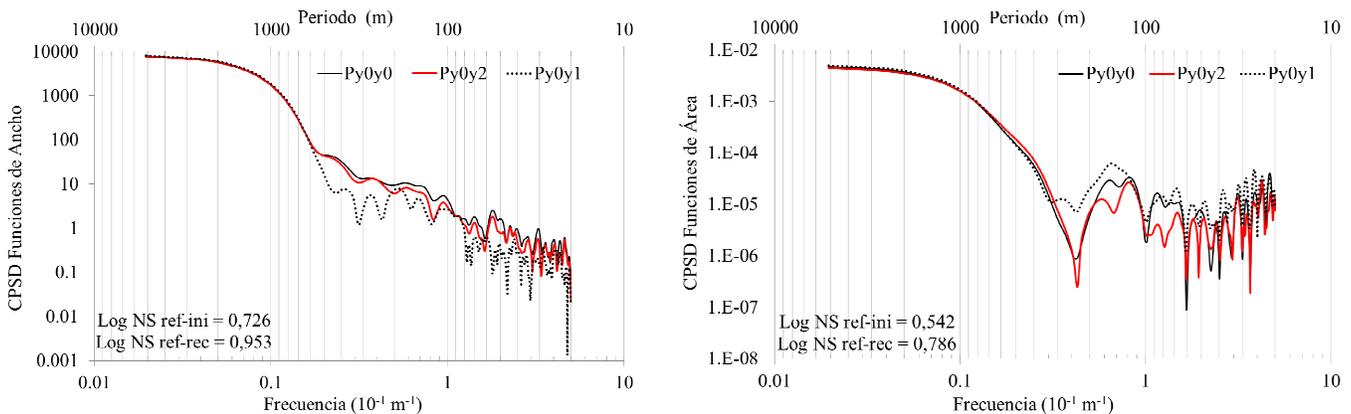


Figura 7. CPSD de las funciones de ancho (izquierda) y de área (derecha)

5. DISCUSION Y CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó Geo-PUMMA junto con una metodología para la modelación espacial de cuencas urbanas y periurbanas y un caso de aplicación en la cuenca periurbana del Estero El Guindo en la comuna de Lo Barnechea, en un sector de piedemonte en Santiago. Geo-PUMMA considera en forma explícita los principales elementos del paisaje y permite obtener una red de drenaje compuesta no solo por elementos canalizados sino

también aquellas conexiones no encausadas. Utiliza los conceptos de URH y EHU como unidades de representación del área natural y urbana respectivamente, y mediante el enfoque vectorial representa las principales unidades fisiográficas del paisaje natural y urbano. El método presentado requiere de la utilización de herramientas similares, como Geo-MHYDAS y de comandos disponibles en GRASS. El método consiste en un proceso de delimitación asistido por computador y en ningún caso a una metodología completamente automática. Los resultados vectoriales y sus respectivas bases de datos entregan información útil para cualquier modelo hidrológico distribuido que requiere de una representación detallada de las condiciones del uso de suelo. En el caso de estudio se definieron tres escenarios de representación espacial: malla inicial (que proviene directamente de la intersección de las diferentes capas de entrada), malla de referencia (que corresponde a una malla que segmenta unidades con convexidad < 0.975 y factor de forma < 0.50 , pero que incrementa en forma importante el número de unidades) y malla recomendada (corresponde a una malla que segmenta unidades con convexidad < 0.75 y factor de forma 0.20, que sin incrementar en forma importante el número de unidades, permite obtener una conexión hidrológica representativa). De esta manera se extrajeron tres redes de drenaje asociadas a las mallas inicial, recomendada y de referencia. Los resultados obtenidos del CPSD en la cuenca del Estero El Guindo muestran las mayores diferencias entre las funciones de ancho de inicial y de referencia se observan a partir de frecuencias altas, asociadas a escalas del orden de 500 m. Para la función de ancho las mejoras se observan en las escalas de 100-300 m, esto debido a que al mejorar la segmentación de la cuenca desaparecen los saltos irregulares que se observan en la función de área de la malla inicial. Al aumentar la segmentación de las URH se obtiene una malla que representa más acorde a la topografía, que permite obtener una red drenaje más realista, sin embargo no se desea incrementar en forma exponencial el número de unidades por lo que se aconseja no utilizar valores convexidad y de forma mayores a los de la malla recomendada. La versión actual de Geo-PUMMA fue llevada a cabo en GRASS 6.4 en una máquina virtual con Ubuntu 14 (64b). El uso de Geo-PUMMA y su metodología se recomienda a usuarios con conocimientos en modelación espacial y modelación hidrológica. Si bien no es necesario tener conocimientos de programación es necesario estar familiarizado con el uso de comandos y poseer conocimientos básicos de hidrología urbana que permitan tomar decisiones al momento de realizar simplificaciones de las URH. Geo-PUMMA aún no se encuentra en su versión definitiva, dado que esta herramienta es parte de una tesis en desarrollo, pero es posible solicitar vía correo electrónico al autor de este artículo la versión más reciente.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto MAPA (IDRC 107081-001) y el Proyecto ECOS-CONICYT C14U02. También se agradece a los fondos proporcionados por IRSTEALyon, así como la participación de los Proyectos FONDECYT N° 1131131 y CEDEUS (FONDAP 15110020).

REFERENCIAS

Braud, I., Fletcher, T.D., Andrieu, H., 2013. Preface: Hydrology of peri-urban catchments: processes and modelling, *Journal of Hydrology*, 485, 1-4.

Brossard F., (2011). Automatisation Du Pretraitement Des Donnees Spatiales Pour La Modelisation Hydrologique Distribuee En Zone Peri-Urbaine. Rapport de Stage 2AE. EPMI Ecole D`Ingenieurs. Cemagref-Lyon, pp. 77.

De la Barrera F., 2012. La transformación del paisaje rural-urbano y su efecto sobre los servicios ecosistémicos en una microcuenca de Santiago (Chile). Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona. Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional. (<http://www.tdx.cat/handle/10803/97036>)

DGA-AC, 2000. Modelo de simulación hidrológico operacional cuencas de los ríos Maipo y Mapocho. Dirección General de Aguas. División de Estudios y Planificación, Ayala, Cabrera y Asociados Ingenieros Consultores Ltda.

DOH-EIC, 2004. Diagnóstico y proposición plan maestro de manejo de cauces naturales, cuenca del río Mapocho hasta estero las Hualtatas, Región Metropolitana. Dirección de Obras Hidráulicas, EIC consultores.

Flügel, W.A., 1995. Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modeling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. *Hydrological Processes* 9, 423-436.

GRASS Development Team, 2012. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software. Open Source Geospatial Foundation Project. URL: <http://grass.osgeo.org> (accessed 31 July 2011).

GRASS Development Team, 2014. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.4.4. Open Source Geospatial Foundation. <http://grass.osgeo.org> (ultimo acceso 14/08/2015)

Jankowfsky, S., Branger, F., Braud, I., Gironás, J. and Rodriguez, F. (2013). Comparison of catchment and network delineation approaches in complex suburban environments. Application to the Chaudanne catchment, France. *Hydrological Processes* 27(25), 3747-3761.

Jankowfsky, S., Branger, F., Braud, I., Rodriguez, F., Debionne, S., Viallet, P., 2014. Assessing anthropogenic influence on the hydrology of small peri-urban catchments: development of the object-oriented PUMMA model by integrating urban and rural hydrological models. *Journal of Hydrology*, 517, 1056 - 1071.

Lafont, M., Vivier, A., Nogueira, S., Namour, P., and Breil, P. (2006). Surface and hyporheic oligochaete assemblages in a french suburban stream. *Hydrobiologia*, 564, 183-193.

Lagacherie, P., Rabotin, M., Colin, F., Moussa, R., Voltz, M., 2010. Geo-MHYDAS: A landscape discretization tool for distributed hydrological modeling of cultivated areas. *Computers & Geosciences* 36, 1021-1032.

Mejía A., Daly E., Rossell F., Jovanovic T. and Gironás J., 2014. A stochastic model of streamflow for urbanized basins. *Water Resources Research*, 50 (3), 1984-2001. DOI: 10.1002/2013WR014834.

Paillé, Yvan, (2010). Conceptualisation et modélisation d'une base de données en vue de son implémentation dans un modèle hydrologique distribué. Mémoire de Master 2 Cartographie et Gestion des Espaces à Fortes Contraintes, Université de Nantes, 50 pp.

Plan Regulador Lo Barnechea, 2012. lobarnechea.cl/

Quantum GIS Development Team (2015). Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

Reyes-Paecke, S. y Meza, L., 2011. Jardines residenciales en Santiago de Chile: Extensión, distribución y cobertura vegetal. *Revista Chilena de Historia Natural*. 84: 581-592.

Rodriguez, F, Andrieu, H., Morena, F., 2008. A distributed hydrological model for urbanized areas - Model development and application to case studies. *Journal of Hydrology* 351, 268-287.

Santo Domingo, N., Refsgaard, A., Mark, O., Paludan, B., 2010. Flood analysis in mixed-urban areas reflecting interactions with the complete water cycle through coupled hydrologic-hydraulic modelling? *Water Science & Technology*, 62, 1386-1392.

Sanzana, P., Jankowsky, S., Branger, F., Braud, I., Vargas, X., Hitschfeld, N., Gironás, J., 2013. Computer-assisted mesh generation based on hydrological response units for distributed hydrological modeling. *Computers & Geosciences* 57, 32-43.

Shreve R.L., (1966). Statistical Law of Stream Numbers, *J. Geology*, Vol (74), pp. 17-37.
Rodriguez-Iturbe I., Rinaldo A., (1997). *Fractal River Basins: Chance and Self-organization*. Cambridge University Press, New York, pp. 1-6.

Smith J., Lynn M., Morrison J., Sturdevant-Rees P., Turner-Guillespie D., Bates P., 2001. The Regional Hydrology of Extreme Floods in an Urbanizing drainage Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 3, 267-282.

Villalobos 2014. Informe Técnico Implementación HRU Maipo. Informe Final. Proyecto Desarrollado en el Contexto del Concurso de Tesis Interdisciplinaria. ERIDANUS Ingeniería en Recursos Hídricos, pp. 16.

WMO (2008). Urban flood risk management - a tool for integrated flood management, associated programme on flood management. Technical report.

Xiao, Q., McPherson, E.G., Simpson, J.R., Ustin, S.L. 2007. Hydrologic processes at the urban residential scale. *Hydrologic Processes* 21, 2174-2188.