



# Impacto en la Hidrología de cuencas de la Quinta Región, Chile. Impact on basin hydrology from the Fifth Region, Chile.

## INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Juan Pablo Callejas<sup>1</sup>

### Historial del artículo:

<sup>1</sup>Universidad Diego Portales, Santiago, Chile.  
juan.callejas@mail.udp.cl. teléfono: +56 9 82089595

Recibido  
05-06-2019  
Aceptado  
02-04-2020  
Publicado  
25-04-2020

Palabras Clave:  
Crecimiento  
poblacional  
Urbanización  
Modelos  
numéricos  
Cambios en usos y  
coberturas de  
suelo  
DEM

### Article history:

Received  
05-06-2019  
Accepted  
02-04-2020  
Available  
25-04-2020

Keywords:  
Grow population  
Urbanization  
numerical models  
Changes in land  
use/land cover  
DEM.

## Resumen

Las urbanizaciones con el tiempo desarrollan crecimiento poblacional y urbano, especialmente de sus límites territoriales. Al comenzar este fenómeno las coberturas de los suelos tienden presentar cambios de vegetación a urbano. Es conocido que al generar un cambio de cobertura de una que favorece la infiltración de las precipitaciones a una en la cual predomina el escurrimiento superficial se presentaran cambios en los hidrogramas de respuestas. Pero qué pasa con las ciudades que se encuentran frente a un proceso de expansión y no toman conciencia a tiempo estas alteraciones. El no tomar en cuenta estos cambios produce efectos adversos que pueden poner en riesgo la vida y salud de las personas que habitan estos sectores, como lo fue el caso del socavón ocurrido en la quebrada de Las Petras en agosto del 2017. El presente estudio cuenta con los objetivos de evaluar y actualizar el estudio de Sandoval (2009), el cual identifico a la urbanización como el principal motor de cambio en las coberturas de los suelos de la Quinta Región de Chile. Además de evaluar cuál es la base de datos topográfica, en formato de modelos de elevación digital (DEM), de acceso libre entre las mayormente utilizadas en entregar las mejores aproximaciones a la realidad. La finalidad de generar estudios de esta clase es desarrollar nueva información que permita la confección de modelos numéricos que logren evaluar cuantitativamente el efecto de los cambios en las coberturas y la selección de archivos DEMs.

## Abstract

The urbanizations with time grow population and urban, especially of their territorial limits. At the beginning, this phenomenon is the trends of changes in urban vegetation. It is known that generating a change in coverage that favors the infiltration of precipitation to one in which surface runoff predominates occurs in the changes in the responses. But what about the cities that are facing a process of expansion and not the conscience over time these alterations. Failure to take into account these changes produce adverse effects that can put at risk the life and health of the people living in these sectors, as well as the case of the tunnel in the stream of Las Petras in August 2017. The present study has the objectives of evaluating and updating the Sandoval study (2009), the quality of urbanization as the main engine of change in the areas of the Fifth Region of Chile. The basis of topographic data, the format of digital media (DEM), free access between the main sources of information. The purpose of generating studies of this kind is to develop new information to allow the configuration of numerical models, as well as to evaluate in a quantitative way the effect of the changes in the coverage and the selection of DEM files.



## 1. Introducción

En el año 1914, la ciudad de Valparaíso presentaba la mayor tendencia de crecimiento poblacional en Chile y constituía el puerto más importante del país. La construcción y apertura del canal de Panamá, implicó un deterioro gradual de la economía local (Sepúlveda, 2004) y el estancamiento en su crecimiento urbano. A partir de ello, otros sectores de costa cercanos se transformaron en nuevos núcleos de asentamientos humanos. La ciudad de Concón nació como consecuencia de esa tendencia de crecimiento urbano. (Muga & Rivas, 2009). Concón se encuentra ubicada en la Quinta Región de Chile (Valparaíso) y es parte de la macrozona urbana de la región que se encuentra compuesta por Viña del mar, Valparaíso, Reñaca, Quilpué y Villa alemana. Dentro de este conjunto, Concón (ubicada en latitud 71,46° y longitud 32,95°) es una de las más recientes zonas urbanizadas. Concón es esencialmente una ciudad habitacional o “ciudad dormitorio”, con una tendencia de crecimiento poblacional mayor al de las ciudades circundantes y mayor a otras ciudades del territorio nacional (Muga & Rivas, 2009). Este crecimiento estimado está reflejado en el Plan Regulador de la Ciudad de Concón (Municipalidad de Concón, 2017) en el que se proyectan escenarios probables en base al Plan Regulador Metropolitano de Valparaíso (PREMVAL) (Sandoval, 2009) incluyendo la implementación de nuevos medios de transporte (De Grange, 2010). Los crecimientos poblacionales van de la mano con la expansión de los límites administrativos y los tipos de coberturas en estos. En este contexto, las cuencas hidrográficas de la Quinta Región presentan cambios en sus coberturas y usos de suelo con una marcada tendencia urbana en detrimento de las coberturas naturales (Sandoval, 2009). Existen estudios específicos con respecto al cambio de uso de suelo o cobertura del suelo, pero esos estudios no incluyen los efectos de esos cambios en el régimen hidrológico de las cuencas de la región. Por otra parte, es imperativo el realizar estudios que estimen los efectos del crecimiento urbano en cuencas hidrográficas clasificadas como áridas (tales como las cuencas costeras de la Quinta Región) ya que estas presentan mayor sensibilidad ante crecimientos urbanos rápidos (Álvarez-Garretón et al, 2018). Existen diferentes estrategias para evitar los efectos que la urbanización tiene en el paisaje y hábitats naturales. El paradigma medioambiental planteado por Álvarez (2016) plantea que el restaurar las cuencas hacia su estado natural disminuiría la incidencia de inundaciones en las cuencas. Es notorio mencionar que la ciudad de Concón no hace ninguna consideración respecto a este tema ya que anticipa urbanizar por completo dos cuencas costeras (Las Petras y Autopista, ver **Figura 1**) sin considerar el efecto que esto tendría sobre la hidrología de esas cuencas y la ciudad de Concón. Una tercera cuenca que en la actualidad está muy poco urbanizada (Puente Colmo, ver **Figura 1**) estaría siendo poblada sin seguir ningún

plan regulador. La zona en la que esta cuenca se emplaza presenta baja urbanización formal y algunos asentamientos informales. Dada la tendencia regional, esta cuenca podría llegar a ser rápidamente urbanizada en su totalidad tal como ocurre en Las Petras y Autopista. Es imperativo el realizar estudios cuantitativos que sean capaces de anticipar los efectos de una urbanización rápida en las tres cuencas arriba mencionadas. La estrategia que seguir debería incluir el desarrollo de modelos hidrológicos e hidrodinámicos que calculen, con niveles de certidumbre aceptables, los efectos de la urbanización de esas cuencas en su régimen hidrológico tanto a nivel de cuenca (non-point sources) como a nivel de río/canal (in-stream).

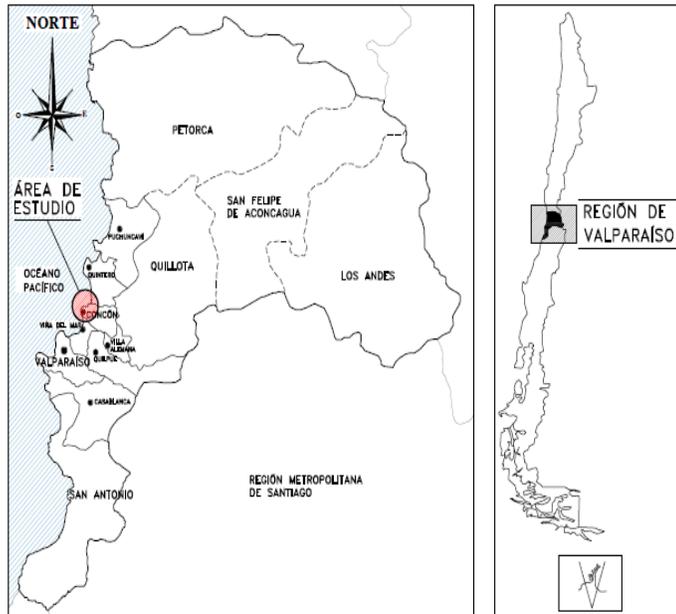
La recolección y análisis de datos fisiográficos espacialmente distribuidos en una cuenca son los pasos previos a cualquier estudio de los procesos hidrológicos que ocurren dentro del área de estudio. Asimismo, los datos de precipitación y de evapotranspiración son requisitos fundamentales para caracterizar la meteorología de la zona. En este contexto, este artículo presenta resultados del estudio de la topografía y de uso/cobertura de suelo para las tres cuencas mencionadas en párrafos precedentes. Asimismo, se propone una estrategia a seguir en futuros estudios de la hidrología de las cuencas y los cambios que podrían ocurrir en su régimen hidrológico como consecuencia del crecimiento urbano.

## 2. Metodología

### 2.1 Área de estudio

La región de Valparaíso presenta una topografía dominada por pendientes y quebradas las cuales son un drenaje natural de aguas pluviales y subsuperficiales de la zona. La región cuenta con dos principales focos de urbanización: el primero compuesto por Viña del mar, Valparaíso y Concón, y el segundo por Villa alemana y Quilpué. Viña del mar, Valparaíso y Concón son el foco principal de las actividades económicas y turísticas de la zona. El presente estudio se realizará en la ciudad de Concón, la cual se ubica en el borde costero de la región de Valparaíso (ver **Figura 1**), limitada por la desembocadura del río Aconcagua en el norte, el océano pacífico por el oeste, y la ciudad de Viña del Mar por el sur. Al estar emplazada en el valle del río Aconcagua, el clima corresponde a uno templado mediterráneo cálido con una temperatura promedio de 15,5° y precipitaciones aproximadas de 300 mm (Inzunza, 2006). El crecimiento urbano es lineal y se extiende hacia el sur del territorio en torno a las vías principales de conexión entre las ciudades de Concón y Viña del mar. En su borde costero destacan grandes proyectos inmobiliarios (Llado, 2016). Hacia el interior se ubica la localidad de Puente Colmo, localizada alrededor de la carretera que enlaza esta urbanización con el actual centro urbano de la

ciudad. Dicha localidad se encuentra en vías de crecimiento.



**Figura 1.** Study area, Las Petras, Autopista and Puente Colmo Basins located in central Chile.

## 2.2 Precipitación y evapotranspiración

Los estudios hidrológicos a escala de cuenca requieren información meteorológica en forma de series temporales de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP). Estos datos fueron recolectados de estaciones pertenecientes a entidades públicas que proveen datos de acceso libre (Meteochile, Agromet, Dirección general de aguas), o bien estimados usando técnicas de desagregación temporal. En la zona de estudio no existen estaciones cercanas que permitan obtener series temporales a escala horaria de evapotranspiración potencial por lo que esta variable fue calculada. Existen diversas ecuaciones que permiten estimar la ETP diferenciándose entre ellas principalmente por la cantidad de variables climáticas que se involucran en la estimación. Uno de los métodos empíricos más completos es el propuesto por la Food and Agriculture Organization (FAO) basado en el algoritmo de Penman-Monteith (Wang et al. 2012). Tanto la precipitación como la ETP serán procesados en Watershed Data Management Tool (WDMUtil). Se recolectará información suficiente para generar dos archivos meteorológicos.

## 2.3 Topografía

En estudios de este tipo se priorizará el uso de información de acceso libre y en formato de modelos de elevación digital (DEM). Existen agencias de investigación aeroespacial, como NASA, que realizan muestreos de este tipo de datos y luego de procesarlos estos son liberados al público. La elección adecuada de la base de datos a utilizar será la que permita obtener delimitaciones de cuencas, subcuencas y redes de drenaje más aproximadas a la realidad. En este estudio se optó por probar cuatro fuentes diferentes que suelen ser las más utilizadas en estudios hidrológicos. Los archivos Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM), ALOS Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (ALOS PALSAR) y una base de datos provista por la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) serán utilizados para el análisis de datos topográficos para estudios posteriores.

## 2.4 Land Use & Land Cover

Por medio de imágenes satelitales de la misión Land Satellite (LANDSAT 8), operado por la NASA y el servicio geológico de estados unidos (USGS), es posible desarrollar archivos actualizados y confiables de usos de suelos. Estas imágenes son obtenidas de manera gratuita para la ciudad de Concón en el mes de febrero del 2018. La información obtenida es procesada en el software ENVI 5.3 en el módulo de ENVI classic (ENVI classic, 2014), donde pueden ser vistas en bandas del color real para compararlas con imágenes de Google Earth con el objetivo de que estas sean representativas. ENVI permite visualizar en infrarrojo cercano permitiendo ver en una gama de rojos todo lo relativo a vegetación inclusive dentro de las zonas urbanas, donde por lo general los otros tipos de archivos realizan consideraciones muy a groso modo donde dentro de lo definido como área urbana no se especifican los pequeños espacios verdes dentro de las cuencas. Usando el módulo de clasificación supervisada de ENVI se pueden identificar pixeles seleccionarlos y relacionarlos con un tipo de cobertura para que luego el programa compare las bandas espectrales de todos los pixeles que conforman el archivo y clasificándolos en los especificados por el usuario con la finalidad de obtener una imagen en formato TIFF de resolución espacial de 30x30 metros. Los usos y coberturas de suelos fueron identificados con ayuda de información digital preexistente (CIREN, 2014) y con inspección visual en visitas a terreno. Se identificaron 4 coberturas predominantes para las tres cuencas en estudio las cuales son resumidas en la tabla siguiente con sus respectivos valores de superficie en kilómetros cuadrados.

### 3. Resultados

#### 3.1 Precipitación y evapotranspiración

Empleando el método de los polígonos de Thiessen se determinó el área de influencia de las estaciones cercanas determinando que las estaciones xx y xx son las más representativas para las variables meteorológicas. El resto de las estaciones fueron usadas para el relleno de datos faltantes en las series temporales. Los resultados de las series generadas de precipitación y evapotranspiración potencial se ilustran en las Figuras 2 y 3.

#### Precipitación

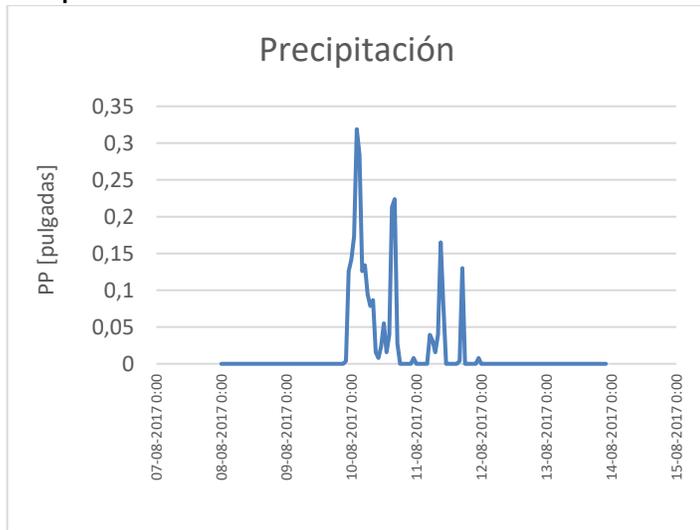


Figura 2. Precipitación horaria para zona de estudio.

#### Evapotranspiración potencial



Figura 3. Evapotranspiración potencial estimada según FAO-Penman Monthet.

#### 3.2 Topografía

Al procesar las bases de datos topográficas seleccionadas se obtuvieron delimitaciones muy diferentes para idénticos umbrales de definición e incluso para algunos casos (DEM ASTER) no se logra ninguna delimitación coherente (cuenca Puente Colmo) como se indica en la Figura 4.

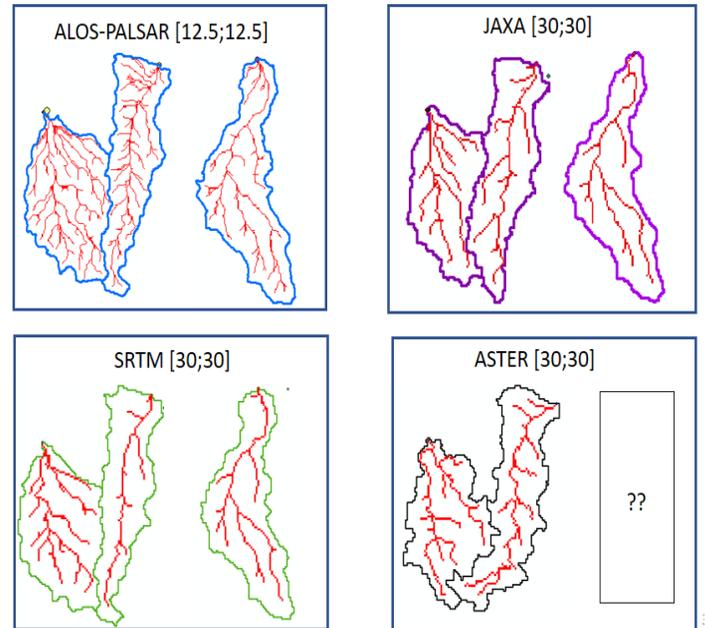
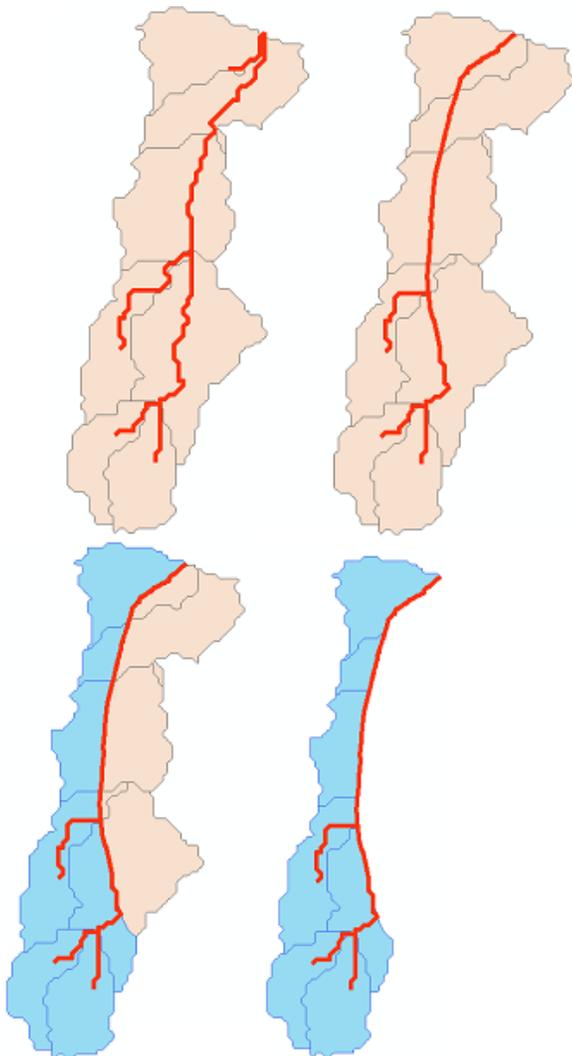


Figura 4. Modelo de elevación digital (DEM) en conjunto con los resultados obtenidos de las delimitaciones de las tres cuencas en estudio por cuatro fuentes de información diferentes.

### 3.3 Ajustes topográficos

La cuenca Autopista recibe este nombre debido a que ella es atravesada en forma casi diagonal por la autopista H-60. Este cruce de ruta altera el drenaje natural dentro de la cuenca por el bombeo con el que cuenta la calzada de la vía. Dicha alteración del área de la cuenca tendrá clara influencia en el hidrograma de respuesta frente a un evento de precipitación. Dicha modificación puede ser realizada en el software Basins 4.1 seleccionando la opción de delimitado automático por medio de una red de drenaje existente. Este último archivo debe ser tipo polilínea (shapefile) (**Figura 5**).



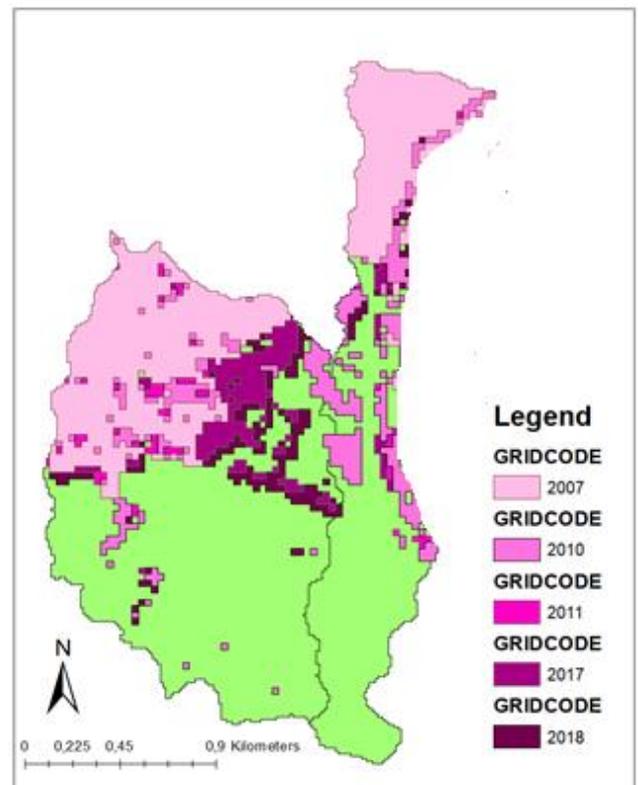
**Figura 5.** Modificación del área aportante cuenca Autopista

### 3.4 Uso y cobertura de suelos

En función de las clases de suelos predominantes identificadas para las cuencas y los resultados de análisis históricos de coberturas se determinó que el cambio de superficie vegetal a urbanizada entre los años 2007 y 2018. Es el indicado en las ilustraciones 4 y 5.

#### Las Petras y Autopista

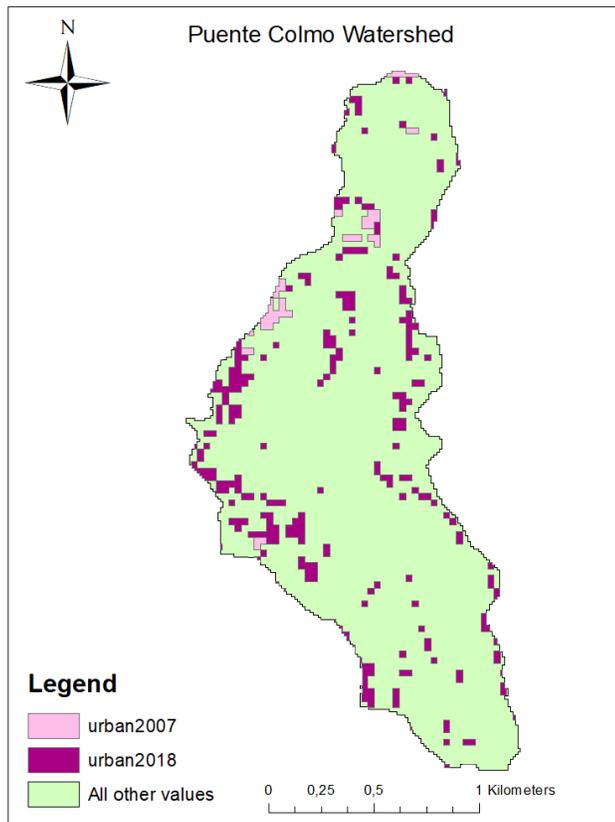
Estas dos unidades al encontrarse emplazadas próximas al centro histórico de la ciudad de Concón se vieron mayormente influencia por la intervención humana llegando a un 50% para la cuenca Las Petras y un 25% para la cuenca Autopista al año 2018 (**Figura 6**).



**Figura 6.** Cuencas Las Petras y Autopista con avance temporal del área urbanizada para el 2007, 2010, 2011, 2017 y 2018.

### Puente Colmo

El avance poblacional en esta cuenca es bastante bajo en el tiempo entre el 2007 y el 2018, presentando una variación casi despreciable (**Figura 7**). Es por ello que la cuenca Puente Colmo se convertiría en la unidad hipótesis del futuro estudio hidrológico en la zona de estudio, para así con lo aprendido de su modelación y análisis de escenarios futuros elaborar comentarios de planificación territorial y gestión planificada del recurso hídrico. En la **Tabla 1** se resumen los valores obtenidos para las 4 clases dominantes dentro del área de estudio para el año 2018, información esencial para una correcta modelación hidrológica.



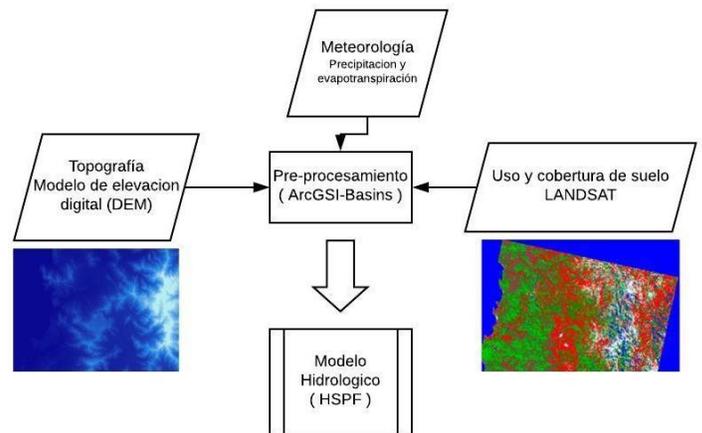
**Figura 7.** Avance área urbanizada cuenca Puente Colmo años 2007 y 2018.

**Tabla 1.** Usos y coberturas de suelo para las tres cuencas analizadas para el año 2018 según clases predominantes.

Class	Land use 2018		
	Las Petras [km2]	Autopista [km2]	Puente Colmo [km2]
Bare soil	0.06	0.06	0.87
Forest	0.81	0.61	0.98
Shrub	0.39	0.32	0.29
Urban	0.89	0.36	0.37
<b>Total</b>	<b>2.14</b>	<b>1.35</b>	<b>2.51</b>

### 3.5 Estrategia propuesta para futuros estudios hidrológicos

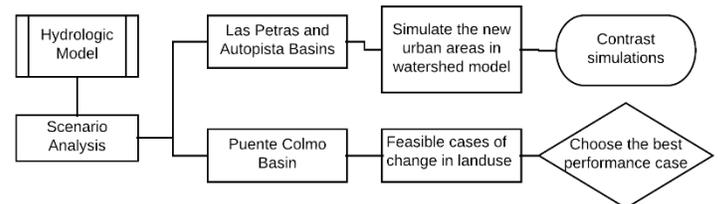
Previo a la confección del modelo hidrológico los datos de uso de suelos y topografía deben ser pre-procesados en ArcGIS 10.3 y luego llevados a escala de subcuencas usando Basins 4.1 para así ejecutar desde la interfaz de Basins the Hydrological Simulation Program Fortran (HSPF). HSPF es un programa versátil el cual es capaz de simular condiciones mixtas de uso de suelos, vegetación y urbano, con módulos para estudiar cantidades y calidades de aguas de flujos superficiales en cauces y canales (REF), tanto de fuentes puntuales como distribuidas.



**Figura 8.** Diagrama de flujo para la generación de un modelo hidrológico.

### 3.6 Análisis de escenarios propuestos para estudios futuros

Cuando el modelo sea calibrado y validado se da paso a la etapa de análisis de escenarios. En esta parte los usos de suelos actuales serán modificados en HSPF para evaluar el comportamiento hidrológico en distintas condiciones de cobertura manteniendo constantes las demás variables relacionadas. En la **Figura 8** se presenta un esquema que resumen el procedimiento.



**Figura 9.** Diagrama de flujo que resume el procedimiento realizado para el análisis de escenarios futuros dentro de las cuencas de estudio.



Estos casos posibles fueron seleccionados según lo extraído de la literatura (plan regulador, 2017). El estado más desfavorable ocurrirá para la cuenca Las Petras y Autopista, donde su cobertura cambiará casi en su totalidad de vegetación a urbana según la proyección poblacional por generada el plan regulador de la ciudad de Concón para el año 2042. En el caso de la cuenca del Puente Colmo el escenario futuro es un poco menos claro por lo indicado en los documentos que regulan a la comuna, debido a que esta cuenca no está incluida en su totalidad dentro del área urbana definida por el plan regulador, esto nos indica que no se cuenta con una gestión adecuada para el manejo de las coberturas de suelos. Al no contar con información suficiente de cambios futuros en las coberturas se modelarán distintos casos que permitan evaluar el comportamiento hidrológicamente de la cuenca e identificar la combinación óptima.

Los casos de análisis consisten en:

- Caso 1: vegetación existe es reemplazada por 25% de áreas urbanas.
- Caso 2: vegetación existe es reemplazada por 50% de áreas urbanas.
- Caso 3: vegetación existe es reemplazada por 75% de áreas urbanas.
- Caso 4: vegetación existe es reemplazada por 100% de áreas urbanas.

#### 4. Discusión

El acceso a información satelital de acceso libre y de buena calidad, en conjunto con el desarrollo de softwares, permiten a los investigadores procesar imágenes y así generar nueva, actualizada y confiable información espacial de usos de suelo reduciendo la incertidumbre en los resultados de las variables simuladas con respecto a este parámetro con una baja inversión de tiempo de investigación. Los resultados indican, al igual que lo señalado por Sandoval (2009,) que el principal motor de transformación en las coberturas de los suelos en la zona es la intervención humana.

Es necesario elaborar estudios hidrológicos en la zona de estudio que permitan determinar de forma cuantitativa la influencia de estos cambios en la hidrología de las cuencas en la zona.

#### 5. Conclusiones

La información topográfica provista por entidades, públicas o privadas, presenta gran variabilidad espacial en los resultados entregados luego de ser procesada viéndose mayormente influenciada por la resolución de pixel que tengas estos archivos,

el año de muestreo y los procesamientos previos a la liberación de los datos. Bases de datos más gruesas y antiguas presentan menor definición en las delimitaciones y presentan drenajes muy diferentes a la realidad.

Los parámetros de entrada para la elaboración de un modelo hidrológico en Hydrological Simulation Program Fortran (HSPF)

#### 6. Referencias

- [1] Sepúlveda Swatson, D. (2004). Chile: Momentos Urbanos y Demográficos del Siglo Veinte[Ebook] (1st ed.). Camilo Arriagada Luco. Jefe de Departamento de estudios DITEC. Extraído desde: [http://www.minvu.cl/opensite\\_20070411164518.aspx](http://www.minvu.cl/opensite_20070411164518.aspx)
- [2] Ilustre Municipalidad de Concón. (2017). Ordenanza Publica Actualización Plan Regulador Concón. Recuperado de: <http://www.concon.cl/transparencia/varios-pladeco-cuenta-publica-1/plan-regulador-1.html?layout=table>
- [3] Lladó Javiel, M. (2016). *Crecimiento Inmobiliario en el Borde Costero de Valparaíso Análisis de los casos de Reñaca/ Concón y Algarrobo/ Mirasol*. Magister en Urbanismo. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- [4] DE GRANGE C, L. (2010). *El gran impacto del Metro*. EURE (Santiago), 36(107).
- [5] Muga W, E. and Rivas, M. (2009). *Chile: del país urbano al país metropolitano. Mutaciones y cambios en la estructura urbana del Área metropolitana de Santiago y Valparaíso*. 1st ed. [e-book] Santiago, Chile.: Rodrigo Hidalgo - Carlos A. de Mattos - Federico Arenas. Available at: [http://geografia.uc.cl/images/serie\\_GEOlibros/del\\_pais\\_urbano/Eliana\\_Muga\\_Marcela\\_Rivas.pdf](http://geografia.uc.cl/images/serie_GEOlibros/del_pais_urbano/Eliana_Muga_Marcela_Rivas.pdf)
- [6] Sandoval, G. (2009). *Análisis del proceso de cambio de uso y cobertura de suelo en la expansión urbana del gran Valparaíso, su evolución y escenarios futuros*. (tesis para optar a título de geógrafo). universidad de Chile, Santiago de Chile. Recuperado de: [http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2009/aq-sandoval\\_g/pdfAmont/aq-sandoval\\_g.pdf](http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2009/aq-sandoval_g/pdfAmont/aq-sandoval_g.pdf)
- [7] United States Environmental Protection Agency (EPA). (2013). Basins (Version 4.1) [Windows]. <https://www.epa.gov/ceam/basins-download-and-installation> .
- [8] EXELIS visual information solutions. (2014). ENVI classic (Version 5.3) [Windows]. [http://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/envi/ENVI\\_Classic\\_Intro.pdf](http://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/envi/ENVI_Classic_Intro.pdf)



- [9] Álvarez. L. (2001). Cambios de paradigma *Valparaíso. Infiltración H30: Infiltración de las aguas. Serie: Territorio y paisaje. Magister territorio y paisaje (UDP)*. Instituto de Geografía (PUCV) 2016, paginas 12-15.
- [10] Insunza B, J. (2006). *Meteorología Descriptiva y Aplicaciones en Chile* [Ebook] (1st ed., p. Capítulo 15). Concepción. Extraído de:  
[http://nimbus.com.uy/weather/Cursos/Curso\\_2006/Textos%20complementarios/Meteorologia%20descriptiva\\_Inzunza/cap15\\_Inzunza\\_Climas%20de%20Chile.pdf14](http://nimbus.com.uy/weather/Cursos/Curso_2006/Textos%20complementarios/Meteorologia%20descriptiva_Inzunza/cap15_Inzunza_Climas%20de%20Chile.pdf14)
- [11] Erazo Ch, A.M. (2010). *Impactos de cambios de uso de suelo en la escorrentía superficial en la cuenca del arenal Montserrat en la ciudad de san salvador en el periodo de 1992-2009 - El Salvador* (Investigadora Hidróloga). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales MARN / Servicio Nacional de Estudios Territoriales SNET – El Salvador, El salvador. Recuperado de:  
<http://www.snet.gob.sv/estudios/uploads/impactosCambioUsoSuelo.pdf>.