

CARTOGRAFÍA HÍDRICO-URBANA PARA EL ANÁLISIS DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Juan José Barrios

La relevancia de una propuesta de estabilización hídrica para una determinada región hidrológica (y las cuencas hidrográficas que la componen), está directamente relacionada con la calidad y disponibilidad de información sobre la gestión y el uso de los recursos hídricos y las características morfo-tipológicas de las poblaciones circunscritas dentro de los límites geográficos de la región. En este sentido, dentro de las disciplinas de la hidrología, la hidrografía, el urbanismo y la arquitectura, se pueden construir cartografías híbridas para visualizar con mayor precisión los efectos de la antropización sobre los sistemas hidrográficos, y los riesgos inminentes del mismo sistema hacia las poblaciones. Lo anterior es posible mediante la incorporación de indicadores compatibles dentro de una misma proyección cartográfica y visión dimensional.

En el siguiente artículo, se organizan una serie de cartografías híbridas a través de una perspectiva de enfoque múltiple (inter-escalar y multi-escalar) aplicadas a la región hidrológica 36 en México. Estas cartografías permiten interpretar las dinámicas en los usos del agua por parte de las comunidades urbanas y rurales, así como de sus superficies agro-productivas. Los mapas son útiles para el análisis de las alteraciones al ciclo hidrológico, y la posterior aplicación de intervenciones urbanas específicas para la prevención y mejora de la red hídrica y la infraestructura hidrológica.

Palabras clave: Urbanismo hídrico, estrés hídrico, huella hídrica, restauración fluvial

The relevance of a water stabilization proposal for a certain hydrological region (and the river basins that compose it), is directly related to the quality and availability of information on the management and use of water resources and the morpho-typological characteristics of the populations circumscribed within the geographic limits of the region. In this sense, within the disciplines of hydrology, hydrography, urban planning and architecture, hybrid cartographic notions can be built to visualize with greater precision the effects of anthropization on hydrographic systems, and the imminent risks of the same system toward the population. This is possible by incorporating compatible indicators within the same cartographic projection and dimensional vision.

In the following article, a series of hybrid cartographies are organized through a multiple-approach perspective (inter-scalar and multi-scalar) applied to hydrological region 36 in Mexico. These cartographies facilitate the interpretation of water use dynamics by urban and rural communities, as well as their production surfaces. The maps are useful for the analysis of alterations to the hydrological cycle, and their subsequent application to specific urban interventions for the prevention and improvement of the water network and hydrological infrastructure.

Keywords: Water urbanism, water stress, water footprint, river restoration

1. Introducción

El objetivo de esta investigación es desarrollar una metodología para la generación de cartografías hídricas mediante un enfoque geográfico de cuenca. Para ello se incorporan los datos geoestadísticos y catastrales disponibles en el territorio mexicano y se aplican en el contexto de la región hidrológica número 36.¹ Cuando la información vectorial no existe o no se encuentra homologada para su uso dentro de Sistemas de Información Geográfica (SIG) se opta por exponer el proceso para construirla mediante las herramientas incluidas en software SIG.

Se ha decidido enfocar el estudio sobre la región hidrológica 36 a la que pertenecen las cuencas de los ríos Nazas y Aguanaval (zona noroeste de México), debido a que estas cuencas presentan un grado de presión² elevado sobre los recursos hídricos. Una primera aproximación a la región mediante la búsqueda de información geoespacial disponible permite reconocer una serie de carencias en las distintas escalas de trabajo, pero principalmente en la escala territorial (menor o igual a 1:50.000) y en las comunidades rurales fuera de los perímetros urbanos. Aunque el Instituto Nacional de Estadística y Geografía en México (INEGI) cuenta con una estructura importante y recursos nacionales, la producción de información local depende de organismos descentralizados con magnitud y presupuesto variable. A pesar de que el desarrollo de información catastral es un proyecto nacional urgente, aún se encuentra en desarrollo en el país.

Si bien, se cuenta con información sobre algunas localidades urbanas de mayor envergadura dentro de la región como la ciudad de Torreón, dicha información catastral tampoco incluye las edificaciones, información fundamental para los estudios morfológicos. Si se toma en cuenta que un proyecto de restauración regional requiere de una homogeneidad en la información de todas las poblaciones involucradas en la administración y consumo de los recursos hídricos, es fundamental generar información cartográfica que nos la permita definir.

1. Las regiones hidrológicas son agrupaciones de cuencas. En el territorio mexicano se encuentran reconocidas 37.

2. "Grado de presión es el porcentaje que representa el agua empleada en usos consuntivos respecto al agua renovable. Es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico de un país, cuenca o región. El grado de presión puede ser muy alto, alto, medio, bajo y sin estrés. Se considera que si el porcentaje se encuentra entre 40 y 100% se ejerce un grado de presión alto, o cuando es mayor de 100% muy alto" (CONAGUA, 2018: 90)

Además de la información catastral y edificatoria es necesario incorporar las cartografías hídricas, la morfología del catastral agrícola. Esto permite reconocer las dinámicas productivas, y las superficies en uso y disponibles en su porcentaje relacional a la extensión de la cuenca hidrográfica. La incorporación de esta capa de información hace posible comprender las lógicas de asentamiento y producción de un conjunto de poblaciones desde la historia del territorio y su colonización.

Conocer la forma del territorio para comprender los procesos relevantes en la transformación de la matriz biofísica es fundamental para entender el resultado formal del orden territorial (Eizaguirre, 1990: 15). Es en este conocimiento y a través del poder de la definición de los componentes del territorio (De Solà-Morales, M., 1989: 16) que se pueden sintetizar alternativas para la mejora de las dinámicas productivas de las poblaciones dentro de las cuencas hidrográficas.

La cartografía resultante del análisis de los componentes del territorio, permite visualizar una serie de mapas hídrico-urbanos que, en conjunto, constituyen una base de conocimiento que considera a todas las poblaciones de la región como parte fundamental de un proyecto de restauración fluvial. Utilizando como hilo conductor el agua, se podrá visualizar de manera intra-escalar las afectaciones a los flujos hídricos y el ciclo hidrológico de la región y fomentar estrategias afines con la mejora de la estabilidad hídrica pero también de los escenarios urbano-productivos y rural-productivos del conjunto de comunidades.

A continuación, se presenta el desarrollo de la metodología en base a 4 escalas para la generación de cartografías hídrico urbanas, se procede desde la mayor escala territorial hasta la local.

2. Escalas de trabajo: Unidades de análisis en territorios bajo estrés hídrico elevado. Cuenca, subcuenca, microcuenca y cuenca urbana.

En este apartado de la investigación se determinan, además de los límites físicos, los márgenes teórico-conceptuales de las cuencas hidrográficas, y se utilizan definiciones principalmente encuadradas dentro del contexto mexicano. A partir de estas unidades de análisis, se establecen los alcances urbanos indirectamente, es decir, las fronteras definidas de las cuencas determinaran los límites en la cantidad de poblaciones a evaluar para un alcance total de la región. Estas poblaciones con sus líneas de comunicación y espacios productivos comprenderán el alcance urbano del estudio.

La finalidad es reconocer como punto de partida para la aproximación a la restauración fluvial un enfoque en las regiones hidrológicas, sus cuencas y subdivisiones. De acuerdo a Cotler y Caire (2009:18) La planeación y la gestión en el contexto de una cuenca posibilitan una visión global y sistémica

del territorio. Dentro de esta planeación de cuenca se pueden determinar las principales fuentes contaminantes, sus intensidades e impactos en la dinámica eco-hidrológica. Lo anterior con la finalidad de priorizar zonas de trabajo, y facilitar la colaboración entre instituciones para la coherencia de las acciones. En ese sentido, el manejo integral de cuencas, como proceso, proporciona un nuevo rumbo para relacionar ciencia, política y participación pública.

2.1 Región Hidrológica

En el territorio mexicano se han identificado 37 regiones hidrológicas (RH) que agrupan a su vez, cuencas y subcuencas de los sistemas hidrográficos. Los límites de estas regiones están representados por los bordes naturales de las cuencas que agrupan. Si bien existe otro modelo de agrupación de las cuencas desarrollado por CONAGUA que se denomina Región Hidrológico Administrativa (RHA) y que por escala antecedería a la RH, en este estudio se opta por utilizar los límites de las regiones hidrológicas ya que estos respetan las características morfológicas, orográficas e hidrológicas a diferencia de las RHA que se agrupan por divisiones políticas para facilitar la administración de los recursos hídricos.

2.2 Cuenca hidrográfica

La región hidrológica 36 es un sistema hidrográfico comprendido por 5 cuen-

| Región hidrológica | Precipitación normal 1991-2020 (mm) | Área (km²) | |
|--------------------|-------------------------------------|------------|-----------|
| 1 | B.C. Noroeste | 195 | 28 462 |
| 2 | B.C. Centro-Oeste | 119 | 44 314 |
| 3 | B.C. Sureste | 202 | 29 722 |
| 4 | B.C. Noroeste | 137 | 14 418 |
| 5 | B.C. Centro-Este | 132 | 13 626 |
| 6 | B.C. Sureste | 283 | 11 508 |
| 7 | Río Colorado | 98 | 6 911 |
| 8 | Sonora Norte | 294 | 61 429 |
| 9 | Sonora Sur | 474 | 139 37 |
| 10 | Sinaloa | 709 | 103 483 |
| 11 | Presidio-San Pedro | 805 | 51 717 |
| 12 | Lerma-Santiago | 722 | 132 916 |
| 13 | Río Huacila | 1 31 | 5 225 |
| 14 | Río Ameca | 1 07 | 12 255 |
| 15 | Costa de Jalisco | 1 667 | 12 967 |
| 16 | América Coahuilana | 978 | 17 628 |
| 17 | Costa de Michoacán | 916 | 9 205 |
| 18 | Balsas | 947 | 118 265 |
| 19 | Costa Grande de Guerrero | 1 176 | 12 132 |
| 20 | Costa Chica de Guerrero | 1 253 | 39 636 |
| 21 | Costa de Oaxaca | 962 | 10 514 |
| 22 | Tehuacanpác | 990 | 16 363 |
| 23 | Costa de Chiapas | 2 314 | 12 293 |
| 24 | Bravo-Colechos | 4 18 | 228 74 |
| 25 | San Fernando-Soto la Marina | 7 19 | 54 061 |
| 26 | Pánuco | 658 | 96 969 |
| 27 | Norte de Veracruz (Tuxpan-Niutla) | 1 471 | 26 592 |
| 28 | Papaloapan | 1 514 | 57 305 |
| 29 | Coahuilense | 2 169 | 30 217 |
| 30 | Grijalva-Huamantla | 1 77 | 102 465 |
| 31 | Yucatán Oeste | 1 231 | 25 443 |
| 32 | Yucatán Norte | 1 196 | 58 135 |
| 33 | Yucatán Este | 1 252 | 38 308 |
| 34 | Cuencas Cerradas del Norte | 361 | 80 629 |
| 35 | Mérida | 299 | 62 639 |
| 36 | Nazas-Aguascaltepec | 380 | 63 632 |
| 37 | El Salado | 435 | 87 601 |
| | Total | 740 | 1 959 246 |



Fuente: CONAGUA, 2021. Subdirección General de Administración del Agua. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) 2022.

Fig. 01. Las 36 regiones hidrológicas identificadas por la Comisión Nacional del Agua. En azul la RH36 objeto de este estudio.

Elaboración propia a partir de datos geoespaciales del Sistema Nacional de información (SINA).

<http://sina.conagua.gov.mx/sina/tema.php?tema=regionesHidrologicas&ver=mapa&o=0&n=nacional>

cas y 33 subcuencas de acuerdo con la información de la red hidrográfica desarrollada por el INEGI³. Se observa que debido a que la cuenca conserva unas determinadas características geomorfológicas y que dentro del espectro de los estudios urbanos la delimitación de los objetos estudios es relevante, en esta investigación se opta por utilizar la cuenca como primera aproximación al territorio:

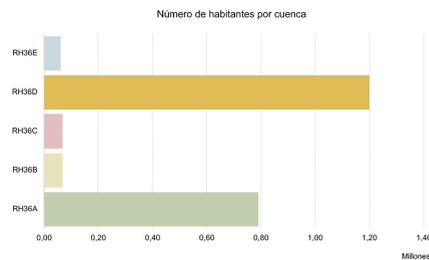
“Las cuencas hidrográficas son consideradas como la unidad territorial básica para la planeación y el manejo de los recursos naturales, así como una dimensión espacial y temporal fundamental para la adaptación ante el cambio climático” (López & Patrón, 2013: 13)

“Se habla de un enfoque de cuenca cuando en un proceso de gestión territorial se hace explícita la relación entre los territorios y los usuarios de cuenca alta y de cuenca baja. Es decir, que se consideran todos los impactos que se generan por las actividades en la cuenca alta hacia la parte baja de la cuenca. Asimismo, se reconocen los servicios ecosistémicos que provee la cuenca”. (López & Patrón, 2013: 17)

2.3 Subcuenca hidrográfica

Para profundizar en escalas inferiores de estudio se consideran las subcuencas, continuando con la jerarquía de la red geográfica. Al igual que en los gráficos anteriores la información geoespacial se integra mediante el software QGIS⁴, a partir de la cual se calculan las superficies y límites.

| Nombre | Cuenca | Clave | Habitantes |
|---------------------------------------|----------------------------|-------|---------------------|
| | Río Nazas-Torón | RH36A | 788 026,00 |
| | Río Nazas-Pedro | RH36B | 66 733,00 |
| Región Hidrológica 36 Nazas-Aguanaval | Presas Lázaro Cárdenas | RH36C | 67 589,00 |
| | Río Aguanaval | RH36D | 1 198 068,00 |
| | Lagunas de Mayrán y Viesca | RH36E | 60 938,00 |
| | Total | | 2 181 353,00 |



Fuente: INEGI. Red Hidrográfica escala 1:50 000 en su edición 2.

Fig. 02. Cuencas que componen la región hidrológica 36 Nazas-Aguanaval. Elaboración propia a partir de datos geoespaciales del INEGI. Red hidrográfica escala 1:50000 edición 2.

3. Clasificación generada a partir de la información geoespacial del INEGI para el año 2010, Red Hidrográfica escala 1:50 000 en su edición 2 disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825007011>

4. De sus siglas en inglés: Quantum Geographic Information System (QGIS), es un software libre de código abierto

Subcuenca

“la superficie de terreno cuya escorrentía superficial fluye en su totalidad a través de una serie de corrientes, ríos y, eventualmente, lagos hacia un determinado punto de un curso de agua (generalmente un lago o una confluencia de ríos)” (Europeas, 2000: 6)

En la región hidrológica 36 se concentran 33 subcuencas según la información del INEGI en su dimensión vectorial. Para calcular el número de habitantes se ha generado una base de datos añadiendo los atributos del marco geoestadístico 2020 a través del *Catálogo Único de Claves de Áreas Geoestadísticas Estatales, Municipales y Localidades*⁵.

2.4 Microcuenca

A escala de microcuenca, es necesario determinar ámbitos particulares de estudio mediante estándares específicos, ya que estos datos geoespaciales no se encuentran incluidos dentro la Red hidrográfica edición 2. Sin embargo, se pueden generar a partir de una subcuenca específica, y el enfoque sobre una vertiente dada. La microcuenca constituye un dominio menor que es apto para acciones de planificación urbana parcial.

“La unidad de planeación es la cuenca. Sin embargo, la unidad básica de ordenación e intervención es la microcuenca, donde puede manejarse y visualizarse la producción en relación con la corriente de agua. Para describir los diferentes usos de la tierra se requiere trabajar con escalas grandes con el fin de representar la parcela o unidad de producción sin importar su dimensión”. (Sánchez et. al., 2003:10)

| | Subcuenca | Subclave | Area km ² | Habitantes |
|----|---|----------|----------------------|----------------|
| 1 | Río Nazas - C. Santa Rosa | RH36Aa | 9118,27 | 720935 |
| 2 | Río Nazas - Los Angeles | RH36Ab | 1380,49 | 30514 |
| 3 | Presa Francisco Zarco | RH36Ac | 1170,28 | 4890 |
| 4 | A. Cuernavaca | RH36Ad | 2159,76 | 24302 |
| 5 | A. La Cadena | RH36Ae | 3159,75 | 1376 |
| 6 | Río Nazas-Rodeo | RH36Ba | 3977,16 | 19869 |
| 7 | Río de San Juan | RH36Bb | 2375,13 | 16678 |
| 8 | Río del Potón | RH36Bc | 3622,87 | 22041 |
| 9 | A. de Nalicha | RH36Bd | 1892,00 | 3145 |
| 10 | Presa Lázaro Cárdenas | RH36Ca | 484,25 | 1021 |
| 11 | A. Grande | RH36Cb | 729,32 | 2594 |
| 12 | Río del Oro o de Swatin | RH36Cc | 2553,78 | 8590 |
| 13 | A. de Matías | RH36Cd | 891,90 | 754 |
| 14 | A. de Lobos | RH36Ce | 515,11 | 160 |
| 15 | Río San Esteban | RH36Cf | 716,54 | 258 |
| 16 | Río del Oro o de Swatin - Río Zaco | RH36Cg | 2442,27 | 5636 |
| 17 | Río Los Tepahuanes | RH36Ch | 3137,23 | 9130 |
| 18 | Río de Santiago | RH36Ci | 3522,59 | 30780 |
| 19 | Río de Ramos | RH36Cj | 2678,56 | 3315 |
| 20 | A. de Poltritos | RH36Ck | 649,10 | 650 |
| 21 | Río Aguanaval - Nazarenos | RH36Da | 3565,75 | 816934 |
| 22 | Río Aguanaval - Presa Doradores Sombrerillo | RH36Db | 3610,6 | 4590 |
| 23 | Río Aguanaval - Río Grande | RH36Dc | 6541,92 | 90916 |
| 24 | Presa El Cazadero | RH36Dd | 103,70 | 1406 |
| 25 | Río San Alfo | RH36De | 1162,84 | 11355 |
| 26 | Río de los Lazos | RH36Df | 1381,90 | 9816 |
| 27 | Río Chico | RH36Dg | 715,78 | 5545 |
| 28 | Río Trujillo | RH36Dh | 1620,28 | 186383 |
| 29 | A. de Mazamitote | RH36Di | 965,21 | 1775 |
| 30 | Río de Santiago | RH36Dj | 2772,53 | 56120 |
| 31 | A. de Reyes | RH36Dk | 671,35 | 1128 |
| 32 | Laguna de Viesca | RH36Ea | 1022,64 | 13327 |
| 33 | Laguna de Mayán | RH36Eb | 10103,46 | 47611 |
| | Total | | 90634,65 | 2181153 |



Fuente: INEGI. Red Hidrográfica escala 1:50 000 en su edición además del Marco Geoestadístico 2020.

Fig. 03. Subcuencas de la región hidrológica 36 Nazas-Aguanaval.

Elaboración propia a partir de datos geoespaciales del INEGI. Red hidrográfica escala 1:50000 edición 2 y Marco Geoestadístico 2020.

multiplataforma.

5. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/ageem/>

2.5 Cuenca urbana

La cuenca urbana es el último elemento considerado dentro del orden jerárquico de las regiones hidrológicas en esta investigación. Según Agredo (2013:124) es en la cuenca hidrográfica donde se originan procesos urbanos de asentamientos humanos, con actividades sociales, económicas, políticas y culturales, apoyadas en sistemas tecnológicos artificiales que se desarrollan a expensas del sistema natural, por lo tanto se considera que es una delimitación fundamental para comprender los fenómenos hidrológicos en la escala de la ciudad.

En esta escala del orden: ciudad y arquitectura, se pueden observar las dinámicas sobre los usos consuntivos del agua, que son más próximas al ciudadano. Por ejemplo, se puede llegar a observar las tipologías de construcción y con ellas determinar la cantidad de agua necesaria para edificarlas. Otro

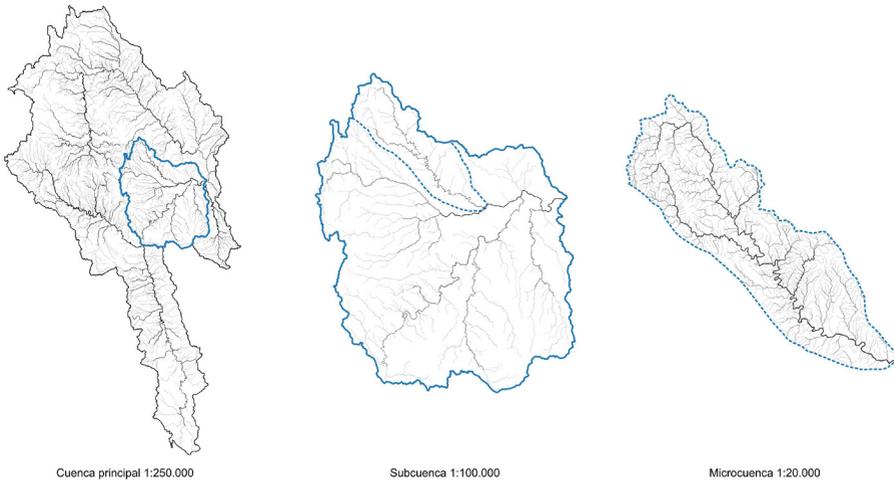


Fig. 04. Estructura jerárquica de la cuenca hidrográfica
Cuenca C (Presa Lázaro Cárdenas), Subcuenca Cj (Río de Ramos), Microcuenca General Escobedo.
Elaboración propia a partir de datos geospaciales del INEGI. Basada en: (López & Patrón, 2013: 11).

ejemplo de análisis a esta escala es entre las edificaciones y los canales mediante sus frentes de fachada. También puede observarse el tipo de impermeabilización del suelo, los drenajes de la cuenca urbana y las capacidades de infiltración y recarga con sus disrupciones sobre el ciclo hidrológico.

Los resultados obtenidos de los distintos análisis llevados a cabo entre el tejido mismo de las ciudades y la estructura vial que las articula, pueden aportar información relevante para el reordenamiento y la identificación de tendencias nocivas dentro del ciclo hidrológico de una cuenca determinada.

En la cuenca urbana, el grado de disrupción del sistema natural es más elevado en comparación a las escalas territoriales, sin embargo a diferencia de las grandes superficies que se trabajan en la escala del territorio, la escala urbana ofrece mayor control sobre los sistemas de drenaje y de soporte a los flujos hídricos. Es por ello que en los territorios bajo estrés hídrico la atención a soluciones que promuevan la recarga y renaturalización de las superficies de captación naturales es principalmente relevante, sobre todo si dentro de estas superficies se concentran grandes poblaciones urbanas como es el caso de la cuenca baja en la región hidrológica 36 con las poblaciones de Torreón, Gomez Palacio y Lerdo.

3. Escala regional

Como bien lo explica Eizaguirre (2019:34) la geomorfología nos enseña que determinados factores geográficos, bióticos, geológicos y antrópicos desencadenan una serie de procesos constructivos y destructivos, en dinámica constante, por lo tanto la superficie terrestre que observamos no es una realidad

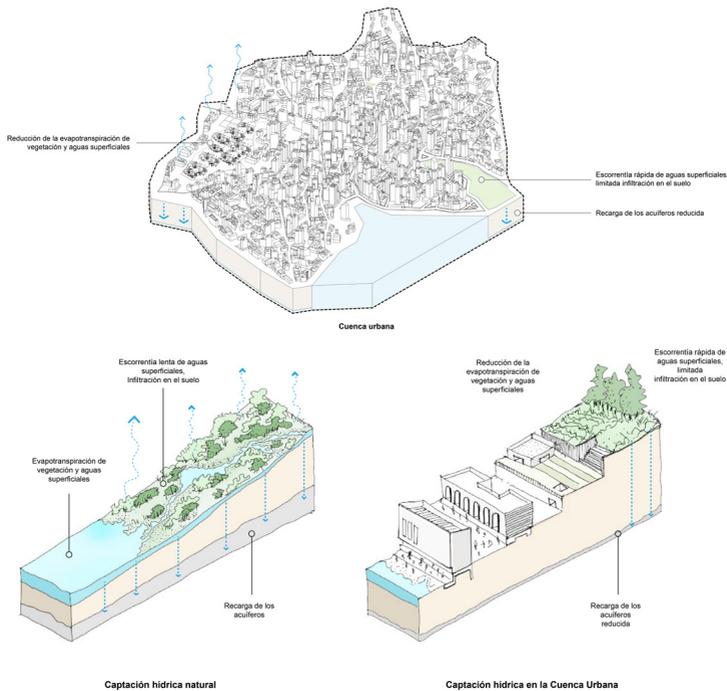


Fig. 05. Modelo esquemático de una cuenca urbana para ejemplificar la disrupción de la red hidrográfica. Elaboración propia

fija, sino en permanente mutación. Esta realidad nos guía hacia la lectura de los componentes del territorio tanto de forma aislada como en su orden jerárquico a lo largo del tiempo.

Para comprender la estructura jerárquica de la región hidrológica se utilizan herramientas propias de la geografía, como son los mapas regionales de grandes escalas a partir de la información satelital disponible. Generalmente para trabajar en estas dimensiones se pueden integrar directamente los datos satelitales a QGIS por medio de complementos como quickmapservices⁶. Sin embargo, cuando se cuenta con capturas satelitales con un mayor grado de precisión para determinadas áreas, es recomendable trabajar con esta información. Por ejemplo: en Cataluña el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) cuenta con un catálogo de ortofotos, imágenes aéreas y capturas mensuales del satélite sentinel-2.

Para el caso de la región hidrológica 36 se utiliza la información satelital de Google Earth y la herramienta quickmapservices. La información se integra en la proyección Cónica Conforme de Lambert (CCL) Datum: ITRF2008. Elipsoide: GRS80. Debido a que los datos geoespaciales provistos por el INEGI se generan en esta proyección. El resultado es información homologada al lenguaje cartográfico del instituto de estadística mexicano.

4. Escala geográfica, geomorfológica

4.1 El diagrama de Strahler y la morfología urbana de la cuenca

El objetivo de combinar información hidrográfica, urbana y agrícola dentro de una misma cartografía permite visualizar, por una parte, el porcentaje antropizado de una cuenca hidrográfica específica y por otro los distintos

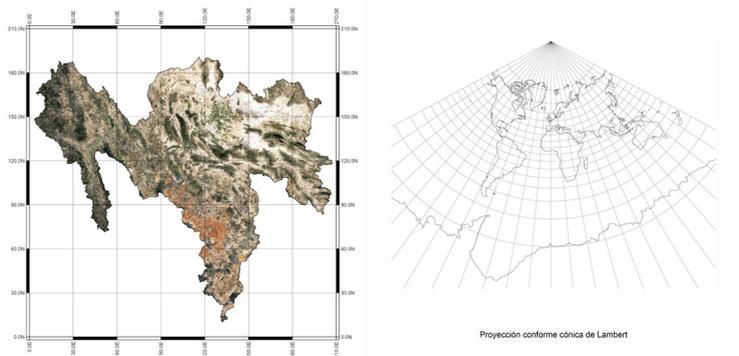


Fig. 06. Imagen Satelital de la región hidrológica 36 en la proyección conforme cónica de Lambert.

Elaboración propia

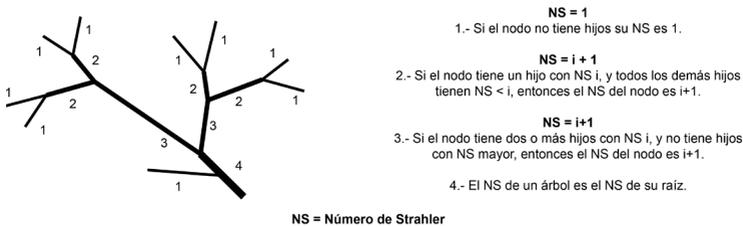
6. Esta herramienta añade la capacidad de insertar las imágenes provenientes de los servicios: Landsat, Google Earth, openstreetmaps, entre otros. Es uno de los complementos más importantes para establecer la primera conexión con el territorio en software SIG.

grados de permeabilidad del suelo de acuerdo con el tipo de cobertura. Estos indicadores influyen en las dinámicas de recarga fluvial de los mantos freáticos y en consecuencia la continuidad del ciclo hidrológico. Adicionalmente a través de ellos pueden relacionarse patrones de asentamiento y grado de presión sobre los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos.

Para comprender la complejidad y jerarquía de las ramificaciones hídricas en una cuenca hidrográfica definida, se opta por utilizar la forma numérica de Strahler⁷. La información sobre las redes hidrográficas puede obtenerse a partir de fuentes especializadas como la Comisión Nacional del Agua en México (CONAGUA). Sin embargo, si estos datos no se encuentran disponibles para una determinada región se pueden calcular a través de imágenes DEM⁸ y el software QGIS⁹.

Una vez incorporada la red hidrográfica, dentro de una proyección cartográfica definida, es necesario añadir los datos urbanos disponibles de las poblaciones urbanas y rurales a analizar. Para ello es necesario acceder a información vectorial de los límites urbanos de las edificaciones que en este caso proviene del marco geoestadístico¹⁰ del INEGI.

Con respecto a las superficies productivas, se añaden las capas vectoriales provistas por el Registro Agrario Nacional (RAN) de México. La informa-



- NS = 1**
1.- Si el nodo no tiene hijos su NS es 1.
- NS = i + 1**
2.- Si el nodo tiene un hijo con NS i, y todos los demás hijos tienen NS < i, entonces el NS del nodo es i+1.
- NS = i+1**
3.- Si el nodo tiene dos o más hijos con NS i, y no tiene hijos con NS mayor, entonces el NS del nodo es i+1.
- 4.- El NS de un árbol es el NS de su raíz.

Fig. 07. Asignación del número de Strahler.
Elaboración propia

7. "En 1945, el hidrólogo Horton introdujo un método para clasificar los sistemas fluviales naturales (Horton, 1945). En 1952, otro hidrólogo Strahler (Strahler, 1952) simplificó este método a su forma actual. Un sistema fluvial se denomina formalmente red de canales. La red comienza con una serie de canales fuente en un extremo y termina con una única salida en el otro. Comenzando con las fuentes, los pares de canales se encuentran en las bifurcaciones de las que se originan nuevos canales. Bajo este esquema un tanto idealizado, los lagos y las bifurcaciones con más de dos puntas se ignoran o se modifican para encajar en el modelo anterior. Cada canal tiene un orden HORTON-STRAHLER. Cada fuente tiene orden 1. Un canal que se origina en una bifurcación toma el orden mayor de las dos puntas a menos que los órdenes sean iguales, en cuyo caso el canal toma ese orden más 1. El orden de la salida se denomina alternativamente el número HORTON-STRAHLER de la red" (traducción de Kruszewski, 1993).

8. De las siglas en inglés Digital Elevation Model, o Modelo Digital de Elevaciones (MDE) es una representación visual y matemática de la altura con respecto al nivel del mar, los valores están contenidos dentro de un archivo ráster.

9. Para metodología específica véase el manual de QGIS en el apartado 17.16: Hydrological análisis. Disponible en: https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/training_manual/processing/hydro.html?highlight=hydrological

10. "El Marco Geoestadístico (MG) es un producto que integra información vectorial y catálogos. Representa al territorio en niveles de desagregación denominados áreas geoestadísticas, que están definidas por límites geoestadísticos; éstos se establecen con base en la normatividad del MG, de conformidad con sus principios y propósitos, por lo que pueden coincidir con los límites político-administrativos que cuenten con sustento legal vigente, descripción clara y precisa que permitan su transcripción cartográfica" (INEGI, 2022)

ción integrada pertenece a las categorías: zonas parceladas, unidades de riego RHA¹¹, y distritos de riego. Esta es la información parcelaria disponible a esta escala geográfica para el territorio mexicano. Es particularmente importante fijar la mirada en las superficies productivas ya que son los espacios de mayor consumo de los recursos hídricos de la cuenca (CONAGUA, 2018: 212). En el siguiente gráfico se presenta el modelo cartográfico logrado mediante la integración de información geoespacial para la subcuenca Río Trujillo,

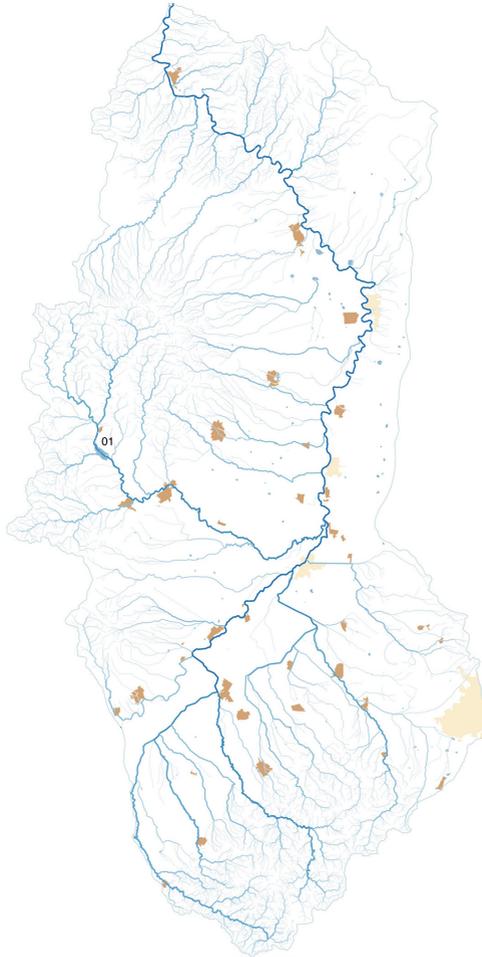


Fig. 08. Interpretación del número de Strahler en la subcuenca RH36Dh. Perteneciente a la cuenca D: Río Aguanaval.

11. Región Hidrológico Administrativa. La CONAGUA determina 13 ámbitos de competencia o unidades básicas para la gestión de los recursos hídricos, estas regiones respetan los límites municipales para facilitar el acceso a la integración de la información socioeconómica (CONAGUA, 2018).

perteneciente a la cuenca Río Aguanaval en el estado de Zacatecas México.

“México ocupa el lugar 7º en la clasificación mundial de países con mayor extracción de agua y porcentaje de uso agrícola, industrial y abastecimiento público, con un total de 87,84 miles de millones de m³/año, de este total el 76% se destina para uso agrícola, el 9,6% para uso industrial y el 14.4% restante para abastecimiento público”

“México también se posiciona en el séptimo lugar a nivel mundial en superficie con infraestructura de riego, contando con 25.670 ha de superficie cultivada de la cual, 6.460 representan la superficie con infraestructura de riego con dominio, un 25,16% del total” (CONAGUA, 2018: 212)

“la prospectiva es que al 2050, la agricultura necesitará incrementar su producción 60% a nivel global, y 100% más en países en desarrollo” (WWAP, U., 2015: 3).

A esta escala de trabajo, una visión tridimensional de la subcuenca ofrece

RH36Dh

Subcuenca Río Trujillo perteneciente a la cuenca Río Aguanaval. Contiene 44 poblaciones dentro de una superficie de 1620,29 km², de las cuales 4 de ellas son del orden urbano.

Es una subcuenca con una capacidad agrícola media-alta si se considera el porcentaje antropizado del área que la compone. Un 32.03% de la superficie de la cuenca esta categorizada dentro de las superficies agroproductivas.

Dentro de los límites de la RH36Dh se localiza una porción de la ciudad de Fresnillo la segunda ciudad zona más poblada de Zacatecas (143.000 habitantes). A pesar de que esta ciudad no se encuentra incluida en su totalidad sobre los límites de la cuenca, sus superficies productivas se extienden dentro de la red hidrográfica.

En esta investigación se considera un total de 156.383 habitantes dentro de los límites de la RH36Dh asumiendo toda la población de Fresnillo.



Zonas parceladas Unidades de riego RHA Distritos de riego



Ubicación dentro de la Región Hidrológica 36



Ubicación dentro de la cuenca hidrográfica Río Aguanaval



Porcentaje cubierto antropizado en la subcuenca 32.03

Fig. 09. Subcuenca RH36Dh. Porcentaje antropizado y categorías de superficies agro-productivas.

Elaboración propia: Incorporación de información geoespacial del INEGI, SINA y RAN. Elaboración propia: datos vectoriales del marco geostatístico INEGI

una perspectiva útil para visualizar el conjunto de poblaciones, sus cultivos y localización con respecto a los principales cuerpos de agua. Este tipo de axonometría tridimensional se considera más útil que el corte bidimensional principalmente porque permite mostrar de mejor manera la topografía y la continuidad de las vertientes y sus enlaces con los centros de población. Este tipo de cartografía se genera a partir de la interpretación de los niveles de cota en la dimensión z provenientes ya sea de información vectorial topográfica o la extracción de curvas de nivel a partir de una imagen ráster DEM.

En este tipo de mapa se pueden observar en una escala geográfica, la cuenca hidrográfica y su organización espacial, así como los espacios abiertos disponibles. En conjunto con la cartografía generada a escala regional es posible analizar las dinámicas entre subcuencas, así como los flujos superficiales de los recursos hídricos a través de la infraestructura hidrológica.

4.2 Infraestructura vial y la red de vertientes

En una cuenca bajo un grado de presión elevado es necesario observar las interacciones con la infraestructura vial. Los nodos de comunicación entre poblaciones en conjunto con los vectores representan un sistema articulado sobrepuesto sobre la red hidrográfica. La representación cartográfica intencionada de estos dos elementos permite visibilizar zonas de conflicto. Para esta cartografía además de integrar la red hidrográfica se añade la red vial provista por la información vectorial del marco geoestadístico.

Las zonas de conflicto se pueden reconocer como áreas donde la interacción

RH36Ba

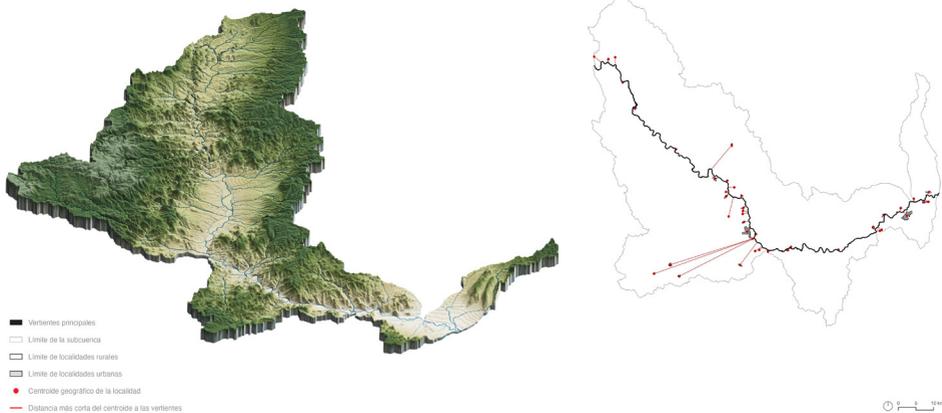


Fig. 10. Subcuenca RH36Ba Río Nazas Rodeo en 3D. Principales poblaciones y distancia al eje hídrico.

Elaboración propia a través de imagen ráster DEM y el complemento de Photoshop 3D map generator. Elaboración propia: datos vectoriales del marco geoestadístico INEGI

de variables específicas pueden generar estrés sobre los recursos hídricos. Entre los elementos que interactúan se pueden nombrar: infraestructuras viales estructurantes, infraestructuras viales integradas, tejidos urbanos, tejidos rurales, presas y canales.

La forma en que la red vial articula las poblaciones y sus superficies pro-

RH36Ad

Arroyo Cuencamé

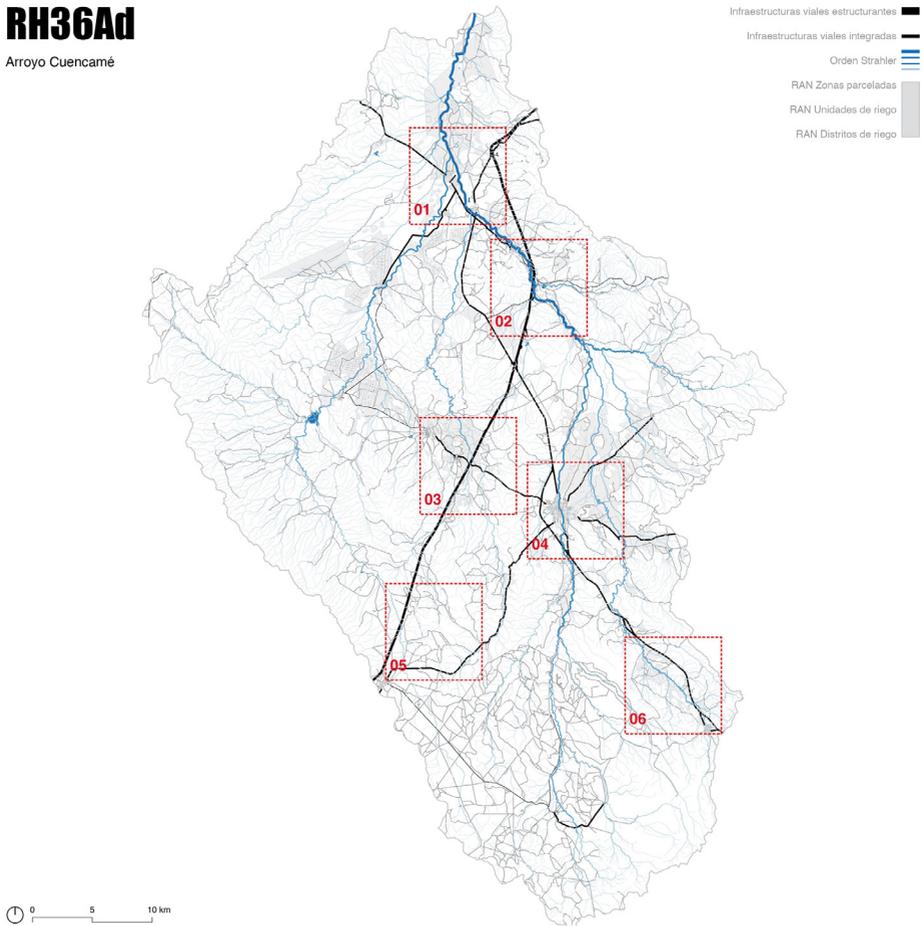


Fig. 11. Subcuenca RH36Ad Arroyo Cuencamé. Interacción entre la red hídrica y las infraestructuras viales. Zonas de conflicto.

Elaboración propia: Datos geospaciales INEGI

Elaboración propia: datos vectoriales del marco geoestadístico INEGI

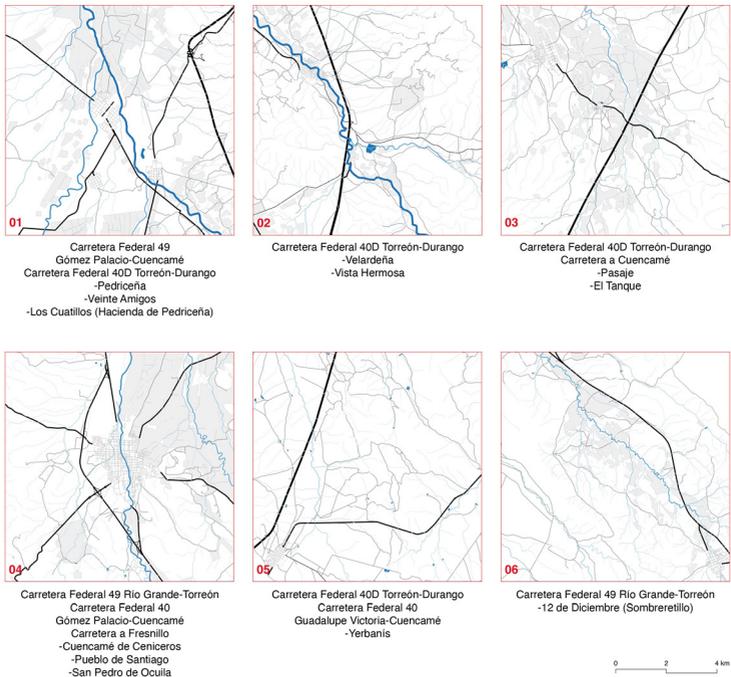


Fig. 12 Principales zonas de conflicto entre la red de infraestructuras viales y la red hídrica en la subcuenca RH36Ad.

Elaboración propia

ductivas está vinculada a las condiciones geomorfológicas del territorio y en consecuencia relacionada a la red hídrica y el sistema de recarga fluvial de la cuenca. Cuando ambos sistemas entran en conflicto pueden condicionar el ciclo hidrológico. Las vías estructurantes son capaces de organizar el crecimiento de las poblaciones, pero esta condición conflictúa con las capacidades de la cuenca para soportar los usos consuntivos del agua.

5. Escala territorial

5.1 Sistema de ciudades y la calidad de sus cultivos

Para generar un mapa donde se puedan representar el tamaño y forma de los cultivos de una determinada población o conjunto de poblaciones es necesario contar con información catastral precisa. Existen algunos casos donde estos datos no se encuentran disponibles y es necesario generarlos mediante software SIG. Una de las técnicas que puede utilizarse se basa en algoritmos bajo el concepto: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NDVI

por sus siglas en inglés. Este es uno de los índices más ampliamente utilizados, cuya función radica en ofrecer información sobre la productividad vegetal (calculada para cada píxel). Esto se consigue mediante una ratio entre las bandas del rojo y el infrarrojo cercano de la imagen, gracias a la reflectancia contrastada de ambas. El rango de valores que puede tomar cada píxel oscila entre -1 y 1, dependiendo del vigor de la vegetación contenida en cada uno (Moreno et al.,2022)

El NDVI es una herramienta usada para determinar el tipo de cobertura terrestre, para ello se utiliza la formula:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

Existen otros métodos para calcular el tipo de cobertura terrestre, así como software para generar los resultados. Para este caso se opta por utilizar Qgis, su conjunto de herramientas SAGA12 y la información del Landsat7 debido a la accesibilidad de la información.

La información necesaria para el cálculo del NDVI son las bandas rojas e infrarrojas generadas mediante teledetección y disponibles a través de la información obtenida por LANDSAT713. Estas bandas pueden descargarse desde el visor¹⁴ del USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos). Las imágenes obtenidas se procesan dentro de QGIS a través de la herramienta SAGA que incluye el algoritmo *vegetation index (slope based)*. Alonso (2016) ha desarrollado un método totalmente detallado para el uso de las herramientas NDVI dentro de Qgis.

El método anterior es útil cuando la información sobre la cobertura vegetal no se encuentra disponible. En el caso de estudio en México, tanto el INEGI como el RAN proveen información sobre la clasificación del suelo a escalas geográficas. Para trabajar a una escala territorial es necesario obtener información catastral precisa en las localidades objeto de estudio. Cuando esta información no se encuentra disponible es posible generarla a través de la vectorización supervisada de imágenes satelitales.

Dentro de Qgis se integra la información satelital obtenida de fuentes como Google, NASA, USGS mediante el plugin quickmapservices. Una vez incrustada la información satelital dentro del espacio de trabajo, se pueden generar las capas edificatorias por medio de la vectorización supervisada de polígonos específicos. Si bien este proceso requiere un tiempo mayor de tra-

12. Por su nombre en inglés System for Automated Geoscientific Analyses,

13. Dentro del programa LandSat de Estados Unidos, el Landsat 7 pertenece al séptimo grupo de satélites puestos en órbita para mejorar la base de datos fotográfica del planeta tierra. Es un esfuerzo entre la NASA y USGS.

14. <https://earthexplorer.usgs.gov/>



Fig. 13 Proceso de vectorización de las edificaciones dentro de QGIS. Elaboración propia.



Fig. 14. Generación de la información edificatoria. Subcuenca RH36Df Río de los Lazos. Elaboración propia: Vectorización supervisada en SIG a partir de imágenes satelitales.

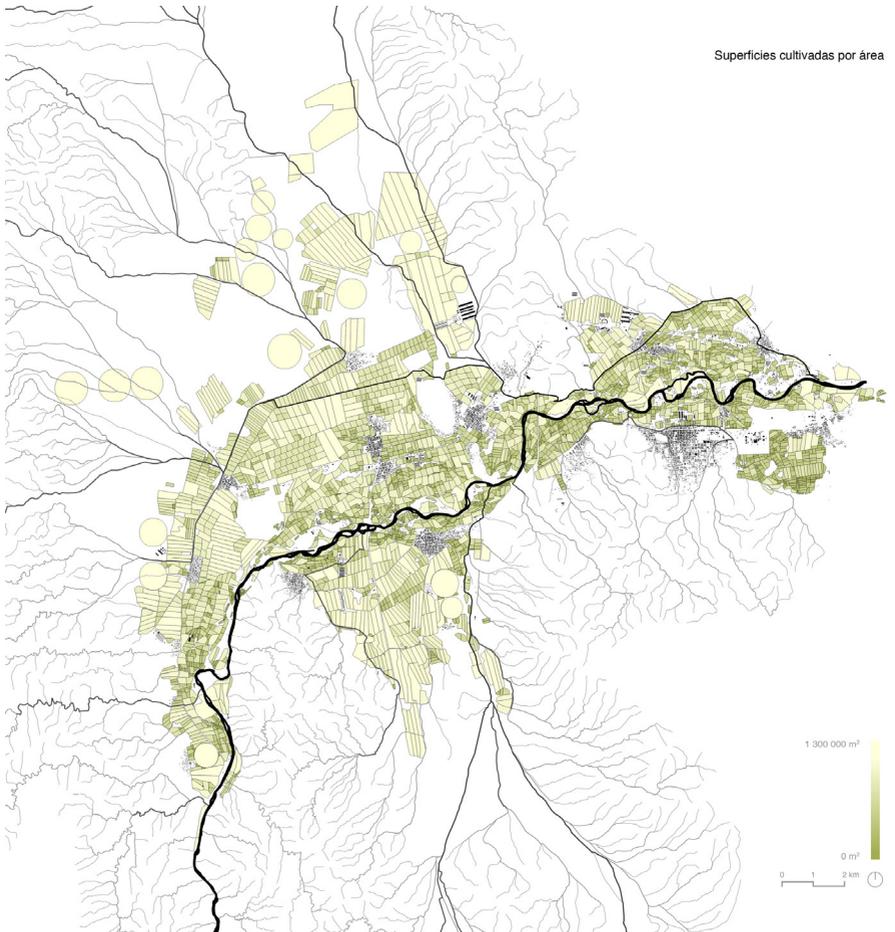


Fig. 15. Subcuenca RH36Ab Río Nazas-Los Ángeles. Principales poblaciones y superficies agro-productivas
Elaboración propia: Datos INEGI, RAN y vectorización en SIG.

bajo, se vuelve más preciso para escalas menores (1:10000) y por tanto útil también para la generación de catastral.

Para la construcción de la información edificatoria se utiliza un método supervisado de vectorización en el software QGIS. Se generan las capas de los edificios a partir de la proyección de la imagen satelital.

Incorporando los datos vectoriales de los cultivos, las edificaciones y la red hidrográfica es posible visualizar las dinámicas de asentamiento próximo a las vertientes y superficies de recarga (Fig.15). Adicionalmente si se agregan atributos a la información vectorial sobre el tipo de cultivo, forma de riego, será posible obtener una imagen más precisa del aprovechamiento de los re-

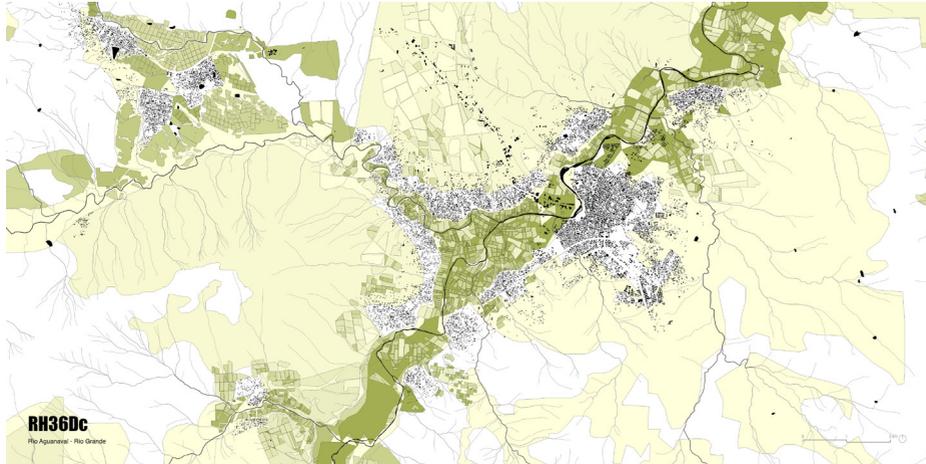


Fig. 16. Subcuenca RH36Dc Río Aguanaval-Río Grande. Principales poblaciones y superficies agro-productivas
Elaboración propia a partir de los datos de INEGI, el RAN y vectorización en SIG.

cursos hídricos en un sistema de poblaciones. Este tipo de cartografía integra la morfología de las poblaciones urbanas y rurales con la morfología y tipo de sus cultivos dando como resultado las superficies de cobertura antropizada del suelo. A partir de estas coberturas de pueden reconocer los índices de permeabilidad en las principales zonas de recarga de los acuíferos y los usos del paisaje ripario en el caso de los sistemas de ciudades próximas al río.

5.2 Huella hídrica aplicada a las edificaciones

“La huella hídrica (water footprint) de un producto es el volumen de agua dulce utilizado para producir el producto, medido a lo largo de toda la cadena de suministro, es un indicador multidimensional, que muestra los volúmenes de consumo de agua por fuente y los volúmenes contaminados por tipo de contaminación; se especifican todos los componentes de una huella hídrica total geográfica y temporalmente. La idea de considerar el uso del agua a lo largo de las cadenas de suministro ganó interés después de la introducción del concepto de ‘huella hídrica’ por parte de Arjen Hoekstra en 2002 (Hoekstra, 2003)” traducción propia de (Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y., 2011)

Otra de las posibilidades en la generación de cartografía que incorpore datos sobre el consumo de los recursos hídricos es la aplicación de la huella hídrica al tejido edificatorio de una determinada población:

“La huella hídrica de una persona, empresa o país se define como el volumen total de agua dulce usada para producir los bienes y servicios consumidos por dicha persona, empresa o país (Hoekstra y Chapagain, 2006).

Dado que no todos los bienes consumidos en un país son producidos en el

mismo, la huella hídrica se calcula tomando en cuenta el uso de los recursos hídricos domésticos y los procedentes del extranjero. La huella hídrica incluye el agua superficial, la subterránea y la humedad del suelo.

La huella hídrica (HH) se calcula como el consumo doméstico de los recursos hídricos, menos las exportaciones de agua virtual, más las importaciones de agua virtual. El consumo doméstico en México se estima en 76 100 hm³ al año. (Arreguín et al., 2007: 129)

$$\mathbf{HH} = \mathbf{Cd} - \mathbf{Exp} + \mathbf{Imp} \quad (\text{Arreguín et al., 2007: 129})$$

Cd = consumo doméstico en hm³/año.

Exp = exportación de agua virtual en hm³/año.

Imp = importación de agua virtual en hm³/año.

Huella hídrica per cápita

$$\mathbf{HHpc} = \mathbf{HH/hab} \quad (\text{Arreguín et al., 2007: 129})$$

HHpc = Huella hídrica per cápita

hab = población de México en millones de habitantes

“La huella hídrica promedio mundial, asociada al consumo y estimada para el periodo 1996-2005, es de 1.385 m³ por persona al año, ... para México es de 1.978 m³ (Mekonnen, & Hoekstra, 2011).

Para integrar la huella hídrica a las edificaciones, es necesario contar con información catastral a nivel edificatorio o generarla a través de la vectorización supervisada sobre información satelital.

Conociendo el promedio anual de la huella hídrica por persona se pueden construir mapas que muestren, dentro de una población específica, la dinámica anual en el uso de recursos hídricos por habitantes dentro de la capa de edificación. Para ello es necesario conocer, además de la huella anual hídrica por persona, el número de personas que habitan en una determinada edificación o conjunto de edificios de una manzana. En el caso mexicano, se puede incorporar este dato a partir de la información censal generada mediante el Inventario Nacional de Vivienda (INV).

Este proceso se puede llevar a cabo ya sea añadiendo la información directamente a la base de datos vectoriales de las edificaciones, o por medio de las coordenadas específicas de cada polígono a través del algoritmo *join attributes by location*¹⁵ dentro de QGIS. El algoritmo *join attributes by location* permite complementar una determinada base de datos que contiene los atri-

15. Unión de atributos por localización.

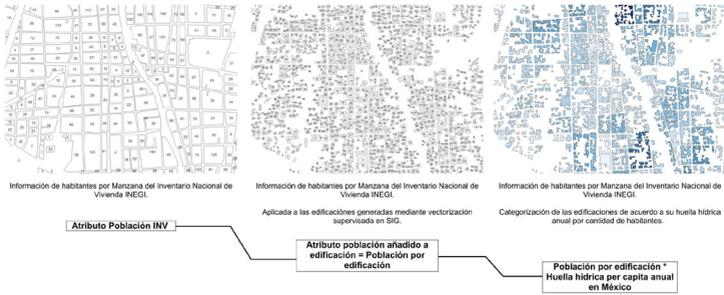


Fig. 17. Proceso en Qgis para la integración de la huella hídrica en la capa de edificación. RH36Ad.4 Población Cuencamé de Ceniceros

Elaboración propia

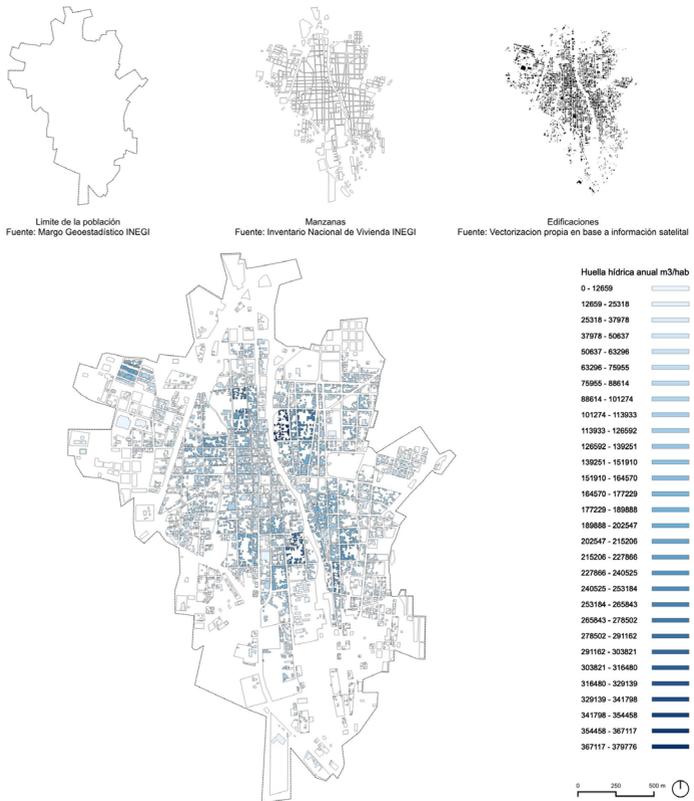


Fig. 18. RH36Ad.4 Población urbana Cuencamé de Ceniceros. Huella hídrica anual m³ habitantes/manzana.

Elaboración propia

butos de una información vectorial determinada. Es decir, conociendo las coordenadas precisas dentro de una misma proyección cartográfica se puede complementar un tipo de información con datos obtenidos de otra fuente.

6. Escala ciudad

6.1 Red de canales en contacto con las edificaciones

En la región hidrológica 36, es fundamental el análisis de la interacción entre las piezas edificadas y los canales. Tomando en cuenta que la red del distrito de riego 017 cuenta con más de 1200 km de canales y drenes (Hernández & Alhers 1999: 26). El tratamiento de los flujos viales y los frentes de fachada debe prestar atención a la preservación de los recursos hídricos y su distribución, principalmente en poblaciones altamente pobladas donde los flujos artificiales del agua se presentan vulnerables ante las dinámicas económicas de los centros urbanos.

7. Escala arquitectura

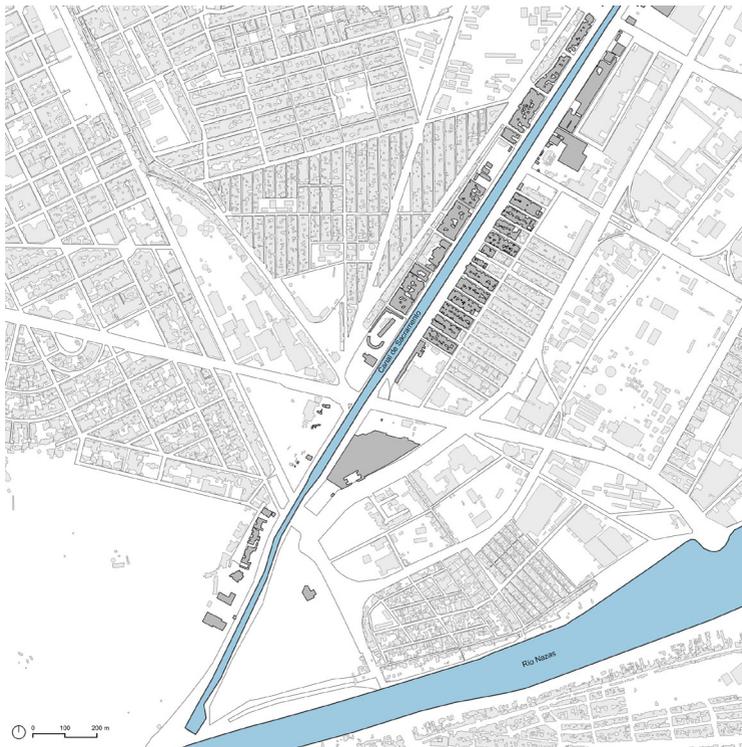


Fig. 19. Edificaciones frente al canal de Sacramento en la ciudad de Gómez Palacio. Subcuenca RH36Aa. Elaboración propia



Fig. 20. Frontes de fachada frente al Canal de Sacramento en la ciudad de Gómez Palacio Durango.
Fotografía: Google street view



Fig. 21. Canal de Sacramento. Detalle de los cruces y edificaciones frente al curso artificial de agua.
Fotografía del autor

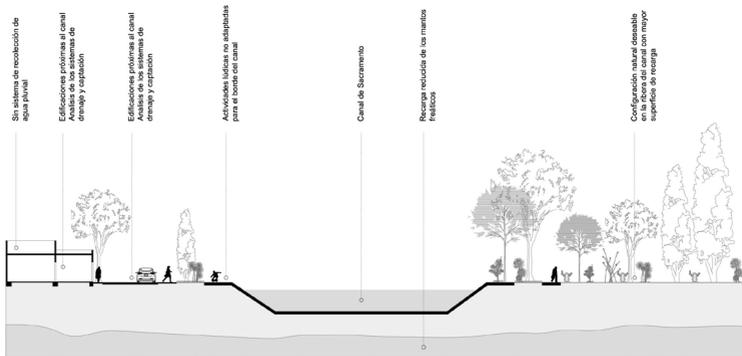


Fig. 22. Corte esquemático estado actual canal de Sacramento.
Elaboración propia

La última escala de trabajo en esta investigación es la arquitectónica. Dentro de la arquitectura, lo que se pretende explorar en relación con el consumo de los recursos hídricos (además de su dinámica con la red hídrica) es la composición material de las edificaciones. La materialidad de cada una de las piezas urbanas, edificios y calles contiene un porcentaje de agua proveniente de la misma cuenca o de alguna cuenca próxima. En este contexto para evaluar la cantidad de agua utilizada para un determinado modelo constructivo es necesario usar el concepto de huella hídrica.

“El agua virtual es la cantidad de agua necesaria que integra un producto o

servicio, por ejemplo: son necesarios 15.415 litros para producir 1 kilogramo de carne de res (ternera), 1.222 litros para 1 kilogramo de maíz y 1.000 litros de agua para obtener 1 litro de leche” (Arreguín et al., 2007; CONAGUA, 2018)

“La huella hídrica de un producto es similar a lo que en otras publicaciones se ha llamado alternativamente el ‘contenido de agua virtual’ del producto o el agua incrustada, incorporada, exógena o sombra del producto (Hoekstra y Chapagain, 2008). Sin embargo, los términos: ‘contenidos de agua virtual’ y ‘agua incrustada’ se refieren únicamente al volumen de agua incorporada en el producto, mientras que el término ‘huella hídrica’ se refiere no solo al volumen, sino también al tipo de agua que se utilizó (verde, azul, gris) y cuándo y dónde se usó el agua. La huella hídrica de un producto es, por lo tanto, un indicador multidimensional, mientras que el ‘contenido de agua virtual’ o el ‘agua incrustada’ se refieren solo a un volumen”. (Hoekstra et al., 2011:46)

Para el cálculo de la huella hídrica por producto se utiliza la fórmula presentada por Hoekstra (Hoekstra et al., 2011:48) en la publicación *The Water Footprint Assessment Manual*:

En el ámbito de la arquitectura se definen criterios basados en las fórmulas de Hoekstra (Hoekstra, 2003) para determinar el consumo de agua para algunos materiales de construcción. Estos estudios se enfocan en el cálculo del “agua incrustada” (Bardhan, 2011) dentro de un determinado producto para así debatir su pertinencia de uso en una región caracterizada por la baja disponibilidad del agua.

A través de investigaciones como las de: Crawford & Pullen (2011), Han,

La huella hídrica del producto de salida *p* se calcula como:

$$WF_{prod}[p] = \left(WF_{proc}[p] + \sum_{i=1}^n \frac{WF_{prod}[i]}{f_p[p,i]} \right) \times f_v[p] \quad [\text{volume/mass}]$$

$WF_{prod}[p]$ = huella hídrica [volume/mass] del producto de salida *p*

$WF_{proc}[p]$ = huella hídrica del proceso del paso de procesamiento que transforma los productos de entrada *y* en los productos de salida *z*

$f_p[p,i] = \frac{w[p]}{w[i]}$ = Fracción de producto:
La cantidad de producto de salida (*w[p]*, mass) obtenida por cantidad de producto de entrada (*w[i]*, mass):

$f_v[p] = \frac{price[p] \times w[p]}{\sum_{p=1}^n (price[p] \times w[p])}$ = La fracción de valor de un producto de salida
la relación entre el valor de mercado de este producto y el valor de mercado agregado de todos los productos de salida (*p=1 a z*) obtenidos de los productos de entrada:

Fig. 23. Cálculo de la huella hídrica por producto. Fuente: Hoekstra, 2011:48

Chen, Meng et al., (2016) se puede observar las dinámicas en los consumos del agua por los principales materiales de construcción civil. En estos estudios se han explorado las cantidades de agua necesaria para producir cada

material y se evalúan las dinámicas de los modelos constructivos actuales con respecto a los usos del agua. Para Han, Chen, Meng et al., (2016) por ejemplo: de la totalidad del agua necesaria para la construcción de un pie cuadrado en China el acero y sus derivados representan el 27,97% del total.

Los estudios anteriores si bien se encuadran dentro geografías distintas a las de la región hidrológica 36 y se enfocan principalmente en el análisis de las grandes intensidades de construcción experimentadas en China o India, representan un punto de partida interesante sobre el tipo de resultado al que se debe de apuntar en un análisis profundo del sistema constructivo de las edificaciones en las cuencas de los ríos Nazas y Aguanaval.

En la región hidrológica 36 el modelo constructivo predominante dentro de

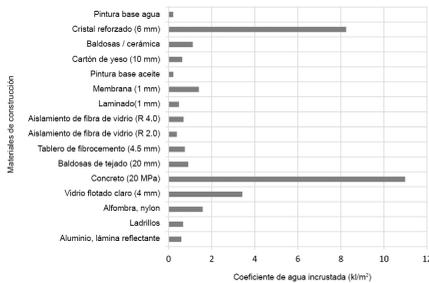


Fig. 3. Principales materiales de construcción con sus coeficientes de agua incorporados, kl/m² (Cravford y Pullan, 2011).

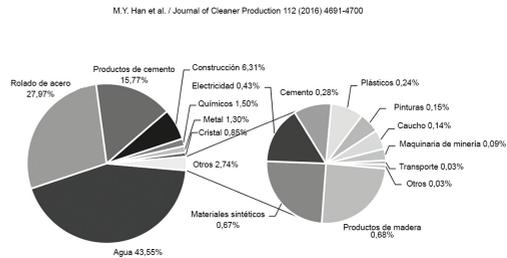


Fig. 5. Componentes de consumo de agua virtual de ingeniería de Estructura y decoración exterior.

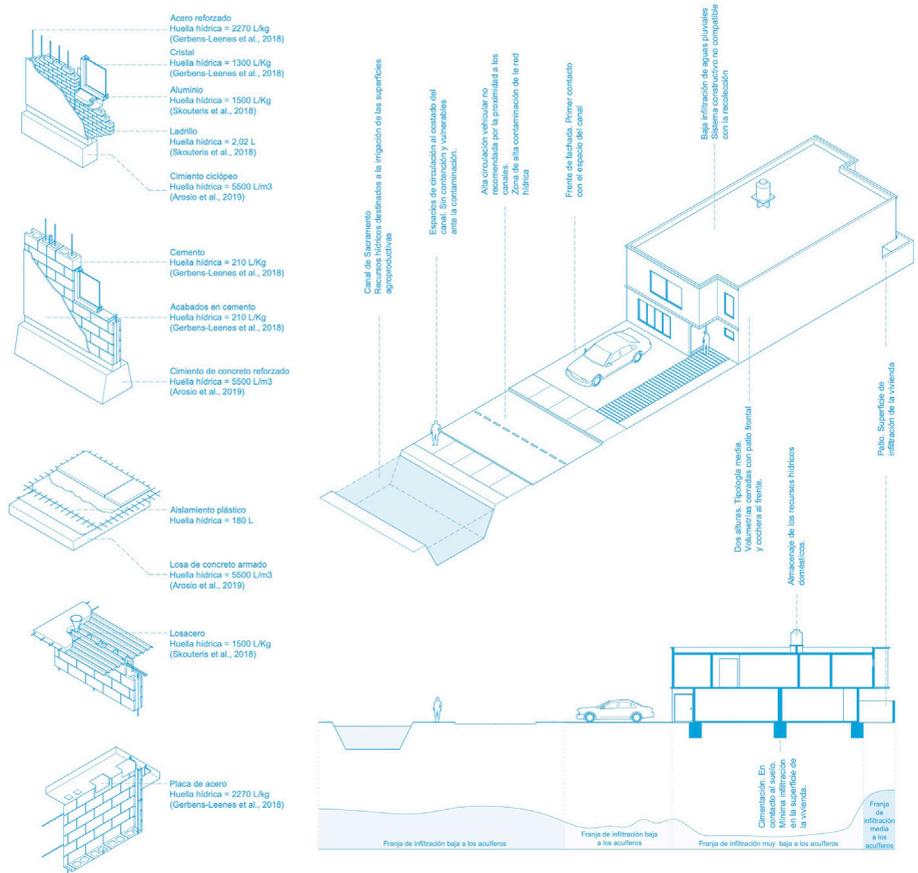
Fig. 24. Traducción de la Fig.3: en Mannan et al., 2020:6. y de la Fig.5 en: (Han et al., 2016:4695)

Fuentes: Environmental impact of water-use in buildings (Mannan et al., 2020:6). Virtual water accounting for a building construction engineering project with nine sub-projects: a case in E-town, Beijing (Han et al., 2016:4695)

la construcción civil se compone de block de cemento, o ladrillos de arcilla, losas de concreto armado, carpinterías de aluminio y cristal. Las cimentaciones conservan también una base de cemento utilizando piedra y acero como agregados. Este modelo tradicional de construcción configura la piel de la mayoría de las edificaciones. En la ciudad las aceras se construyen principalmente de cemento, las calles de concreto hidráulico o asfalto. Cada uno de estos materiales listado aquí brevemente, deben someterse a un análisis de los consumos de huella hídrica. Este tipo de estudio excede los alcances de esta investigación.

En definitiva, es deseable que, en los territorios bajo estrés hídrico, los principales reglamentos y normas de construcción reflejen en sus normas de uso de los materiales, un interés por aquellos materiales que generen un impacto menor sobre los recursos hídricos durante su fabricación.

En conclusión, a esta escala, la información del gasto hídrico por material es recomendable que sea visualizada más que en software SIG, en software BIM



Modelo constructivo en base a mampostería de ladrillo o bloque de cemento frente a Canal de Sacramento
Huella hídrica de algunos de los principales materiales (aproximaciones)

Fig. 24. Modelo constructivo tradicional región hidrológica 36. Materiales de construcción con alto consumo de agua para su producción. Elaboración propia

(Building Information Modeling). Para ello es necesario incorporar la información dentro de las propiedades del material a utilizar para así visualizar los efectos de uso de un material más allá de su condición estética y estructural. Esta adición permitiría encaminar los modelos constructivos desde la eficiencia en el diseño espacial, a la eficiencia en el diseño hídrico y a la eficiencia material.

8. Conclusiones

La inserción y extensión de cada superficie y volumen distinto a la capa vegetal natural del territorio provoca un cambio en la dinámica del ciclo hidrológico, ya sea mediante la introducción de una nueva superficie con menor índice de infiltración al suelo o debido a la disrupción de las vertientes de la red hidrográfica. Estos fenómenos pueden visualizarse mediante las técnicas cartográficas mostradas en esta investigación. Se concluye que gracias a las herramientas y posibilidades que proporciona el software SIG se pueden reconocer los modelos agro-productivos de las poblaciones en una cuenca determinada, y dentro de estos determinar las dinámicas urbano-hídricas que se desarrollan dentro del conjunto.

Utilizar el agua como hilo conductor de la narrativa cartográfica facilita trabajar con múltiples escalas de información, y también facilita la visualización de los usos consuntivos del agua de las poblaciones en relación con las superficies donde se despliegan. Como se observa en los gráficos presentados en este artículo, las posibilidades de representación entre los datos morfológicos y las estadísticas hídricas son muy variadas.

En las escalas menores (ciudad y arquitectura) se advierte la relevancia de incorporar los principales indicadores del consumo de los recursos hídricos con la materialidad y el tejido de la arquitectura y las piezas urbanas. Lo anterior permitirá evaluar la responsabilidad de los sistemas constructivos tradicionales en los consumos de agua y el estrés que ejercen sobre los recursos hídricos dentro de una microcuenca. En un territorio bajo estrés hídrico elevado cada litro de agua puede y debe contabilizarse para optimizarse, esto debería modificar los reglamentos constructivos mediante la recomendación y regulación hacia modelos de construcción más respetuosos con el ciclo hidrológico.

En esta investigación, se ha logrado mostrar una serie de cartografías dentro de los límites de la región hidrológica 36, que pueden permitir la lectura de problemáticas hídricas en cuanto a la protección de la red hidrográfica se refiere. Como es el caso de las zonas conflictivas en la red de infraestructuras viales estructurantes y la impermeabilización de las superficies de recarga en las tipologías urbanas y zonas agrícolas extensivas localizadas en la proximidad de la ribera de los ríos y los bordes de los canales de riego.

Por otra parte, se demuestra que, a pesar de la carencia de información vectorial en determinadas regiones geográficas, existen técnicas dentro de los SIG mediante las cuales es posible producir capas de información útiles para análisis a escala geográfica y territorial. Si bien, la precisión de la información que se puede generar a menores escalas no se compara en calidad con la información del orden territorial, esta información sirve como punto de partida para los estudios urbanos, sobre todo en contextos donde la información catastral a nivel parcelario y edificatorio no está homologada para su utilización en SIG, o simplemente no se encuentra vectorizada y accesible en software

de dibujo asistido por computadora. Es decir, existen formas de producir un análisis morfológico con un enfoque de cuenca partiendo prácticamente de información satelital que es accesible para habitualmente la mayor parte del mundo mediante los recursos de la NASA y el USGS.

Este artículo pretende aportar a la información realizada por cartógrafos profesionales de los casos de estudio específicos. Los resultados obtenidos son útiles para los estudios urbanos dentro del enfoque de cuenca, y se generan con límites definidos por la geografía, e incorporan datos urbanos e indicadores sobre los usos del agua. Son cartografías híbridas para la representación de territorios y sus comunidades bajo estrés hídrico y su carácter es exploratorio y experimental.

Finalmente se concluye que, para poder restaurar el equilibrio hídrico dentro de una región hidrológica y sus consiguientes subdivisiones jerárquicas, es importante contar con un análisis profundo de cada una de las comunidades rurales y urbanas, sus superficies agro-productivas y las infraestructuras hidrológicas que les proveen los servicios hídricos. El análisis urbano de una cuenca hidrográfica se extiende y debe complementarse con los datos estadísticos del agua y la lectura de los flujos de la huella hídrica.

9. Referencias

AGREDO CARDONA, G. A. (2013). La cuenca urbana como unidad territorial para la planificación del desarrollo sostenible en ciudades de media montaña del Trópico Andino. Propuesta de una metodología de planificación y diseño de la estructura construida, circulatoria, verde e hídrica en cuencas urbanas de ciudades de media montaña andina en Colombia: Caso Manizales (Tesis doctoral). UPC, Institut Universitari de Recerca en Ciència i Tecnologies de la Sostenibilitat. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2117/95036>

ALONSO, D. (2016). Mapping Gis. NDVI: Qué es y cómo calcularlo con SAGA desde QGIS recuperado de: <https://mappinggis.com/2015/06/ndvi-que-es-y-como-calcularlocon-saga-desde-qgis>.

ARREGUÍN CORTÉS, F., LÓPEZ PÉREZ, M., MARENGO MOGOLLÓN, H., & TEJEDA GONZÁLEZ, C. (2007). Agua virtual en México.

BARDHAN, S. (2011). Assessment of water resource consumption in building construction in India. *WIT Trans. Ecol. Environ*, 144, 93-101.

CONAGUA (2018). Estadísticas del Agua en México.

COTLER H. Y CAIRE G. (2009). Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México. México: Instituto Nacional de Ecología/WWF/Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P., 380 pp.

CRAWFORD, R. H., & PULLEN, S. (2011). Life cycle water analysis of a residential building and its occupants. *Building Research & Information*, 39(6), 589-602.

<https://doi.org/10.1080/09613218.2011.584212>

DE SOLÀ-MORALES, M. (1989). The culture of description. *Perspecta*, 25, 16-25.

EIZAGUIRRE I GARAITAGOITIA, X. (1990). Los componentes formales del territorio rural: los modelos de estructuras agrarias en el espacio metropolitano de Barcelona: la masía como modelo de colonización en Torelló.

EIZAGUIRRE I GARAITAGOITIA, X. (2019). El territorio como arquitectura

EUROPEAS, D. O. D. L. C. (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de diciembre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Directiva 2000/60/CE.

HAN, M. Y., CHEN, G. Q., MENG, J., WU, X. D., ALSAEDI, A., & AHMAD, B. (2016). Virtual water accounting for a building construction engineering project with nine sub-projects: a case in E-town, Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4691-4700.

HERNÁNDEZ, M. F., & ALHERS, R. (1999). *Naturaleza y extensión del mercado del agua en el DR 017 de la Comarca Lagunera, México*. Instituto Internacional del Manejo del Agua.

HOEKSTRA, A. Y. (ed) (2003) 'Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade', 12–13 December 2002, Value of Water Research Report Series No 12, UNESCO-IHE.

HOEKSTRA, A. Y., & CHAPAGAIN, A. K. (2006). Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. In *Integrated assessment of water resources and global change (pp. 35-48)*. Springer, Dordrecht.

HOEKSTRA, A. Y., CHAPAGAIN, A. K., ALDAYA, M. M., & MEKONNEN, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge.

HORTON, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3), 275-370.

INEGI (2015). Cartografía Catastral Diagnostico Nacional.

<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825076023>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2022). Marco Geoestadístico. Recuperado noviembre 15, 2022, de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463849568>

KRUSZEWSKI, P. (1993). A probabilistic exploration of the Horton-Strahler number.

LÓPEZ, R. F. P., & PATRÓN, E. R. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión.

MANNAN, M., & AL-GHAMDI, S. G. (2020). Environmental impact of water-use in buildings: Latest developments from a life-cycle assessment perspective. *Journal of environmental management*, 261, 110198.

MEKONNEN, M. M., & HOEKSTRA, A. Y. (2011). National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption. Volume 1: Main Report.

MORENO FERNÁNDEZ, S. E., & TRABA DÍAZ, J. (2022). Aplicaciones de SIG y teledetección en ecología: Manual de prácticas en QGIS.

SÁNCHEZ VÉLEZ, A. S., NÚÑEZ, G., & TRUJANO, P. (2003). La cuenca hidrográfica unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales.

SKOUTERIS, G., OUKI, S., FOO, D., SAROJ, D., ALTINI, M., MELIDIS, P., ... & O'DELL, S.

(2018). Water footprint and water pinch analysis techniques for sustainable water management in the brick-manufacturing industry. *Journal of cleaner production*, 172, 786-794.

STRAHLER, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological society of America bulletin*, 63(11), 1117-1142.

WWAP, U. (2015). The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world. United Nations World Water Assessment Programme.

DOI: 10.5821/qru.11935

Juan José Barrios
Departamento de Urbanismo y Ordenación del Territorio (DUOT)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
barrios.avalos.juan@gmail.com