

Evaluando la sustentabilidad de la densificación urbana. Indicadores para el caso de Cuenca (Ecuador)¹

ASSESSING THE SUSTAINABILITY OF URBAN DENSITY. INDICATORS IN THE CASE OF CUENCA (ECUADOR)

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DA DENSIFICAÇÃO URBANA. INDICADORES NO CASO DE CUENCA (EQUADOR)

Natasha Eulalia Cabrera-Jara
 natasha-cabrera@ucuenca.edu.ec

María Augusta Hermida-Palacios
 hermidia@ucuenca.edu.ec

Daniel Augusto Orellana-Vintimilla
 daniel.orellana@ucuenca.edu.ec

Pablo Enrique Osorio-Guerrero
 pablosorio@gmail.com

Recibido: 10 de febrero de 2015

Aprobado: 15 de mayo de 2015

<http://dx.doi.org/10.15446/bitacora.v2n25.49014>

Resumen

Este artículo explica el proceso de generación de un sistema de indicadores que miden la sustentabilidad urbana en ciudades ecuatorianas. La propuesta aborda dos puntos críticos: a) la importancia de construir un sistema de indicadores que recoja la complejidad de la ciudad y pueda condensarse en un índice sintético, y b) la necesidad de mostrar la dimensión espacial de los resultados para comparar diversos tejidos urbanos. La metodología empleada se resume en: 1) construcción de un sistema de indicadores, 2) selección de un área piloto de estudio, 3) levantamiento de información primaria y secundaria, e 4) implementación del modelo de evaluación. El sistema de indicadores fue aplicado en una zona en proceso de consolidación en la ciudad de Cuenca, Ecuador, para evaluar las potencialidades y limitaciones de la metodología.

Palabras Claves: sustentabilidad urbana, indicadores urbanos, ciudad compacta.

Abstract

This article describes the process of generating a system of indicators to measure up the grade of urban sustainability in Ecuadorian cities. The proposal addresses two critical points: a) the importance of create a system of indicators to express the complexity of the city and can be summarized in a basic index; and, b) the need to show the spatial dimension of the results to compare different types of urban fabric. The methodology can be summarized as: 1) Establishing a system of indicators; 2) Selection of a model area as case study; 3) Gathering of primary and secondary information; and, 4) Implementation of the evaluation model. The indicator system was applied in an area subject of an urban consolidation process in the city of Cuenca-Ecuador, to identify potential and limitations of the methodology.

Keywords: urban sustainability, urban indicators, compact city.

Resumo

Este artigo explica o processo de geração de um sistema de indicadores para medir a sustentabilidade urbana em cidades equatorianas. A proposta aborda dois pontos críticos: a) a importância de construir um sistema de indicadores que possa dar conta da complexidade da cidade e que possa condensar-se em um índice sintético; e, b) a necessidade de mostrar a dimensão espacial dos resultados para comparar os diversos tecidos urbanos. A metodologia utilizada pode ser resumida como: 1) Construção de um sistema de indicadores; 2) Seleção de uma área de estudo-piloto; 3) Levantamento de informação primária e secundária; e 4) Implementação do modelo de avaliação. O sistema de indicadores foi aplicado numa zona em processo de consolidação na cidade de Cuenca- Equador para avaliar o potencial e as limitações da metodologia.

Palavras-chave: sustentabilidade urbana, indicadores urbanos, cidade compacta.

¹ Este artículo es resultado de la investigación *Modelos de Densificación Territorial para las zonas consolidadas de la ciudad de Cuenca*, financiada por el Departamento de Investigación de la Universidad de Cuenca.

Natasha Eulalia Cabrera Jara

Arquitecta, magister en Laboratorio de la Vivienda del siglo XXI de la Universidad Politécnica de Cataluña y magister en Ordenación Territorial de la Universidad de Cuenca. Docente en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo e investigadora del Grupo Ciudades Sustentables –LlactaLAB– del Departamento de Espacio y Población de la Universidad de Cuenca. Trabaja en temas relacionados con sustentabilidad urbana y dinámicas del borde urbano-rural de ciudades latinoamericanas.

Daniel Augusto Ore- llana Vintimilla

Biólogo ambiental y especialista en Sistemas de Información Geográfica de la Universidad del Azuay (Ecuador), magister de la Universitat Politècnica de Catalunya (España) y Doctor en Geoinformación de la Universidad de Wageningen (Holanda). Fue coordinador de investigación en sistemas humanos en la Fundación Charles Darwin de Galápagos y actualmente es profesor principal e investigador de los departamentos de Espacio y Población, y Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca (Ecuador).

María Augusta Her- mida Palacios

Magister en Proyectos Arquitectónicos y en Informatización de Proyectos Arquitectónicos, y Doctora en Arquitectura. Directora del Departamento de Espacio y Población, investigadora del Grupo Ciudades Sustentables –LlactaLAB– y docente de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca. Miembro del Consejo Asesor de la revista *Informes de la Construcción* (2015-2018), coordinadora en Ecuador de la Red *Comunidades urbanas energéticamente eficiente*, financiado por CYTED. Fundadora y arquitecta de *Duran-Hermida arquitectos asociados* en donde ha ganado premios y concursos.

Pablo Enrique Oso- rio Guerrero

Psicólogo de la Universidad del Azuay (Ecuador), especialista en Gestión Regional del Desarrollo por la Universidad de los Andes (Colombia) y magister en Estudios Urbanos de El Colegio de México. Ha ejercido cargos públicos en la ciudad de Cuenca (Ecuador) y actualmente trabaja en proyectos de investigación vinculados con las condiciones de vida en la ciudad en el Departamento de Espacio y Población de la Universidad de Cuenca.

Introducción

Los centros urbanos son los mayores consumidores de recursos renovables y no renovables, y son responsables de la mayor parte del desarrollo no sustentable del planeta (White, 1994), por lo que, si las regiones urbanas se diseñan y manejan para minimizar el uso de recursos y la polución, se avanzará significativamente en la solución de varios problemas ambientales (Brehemy, 1992). En esta línea, Moliní y Salgado (2010) señalan en su estudio sobre superficie artificial y viviendas unifamiliares en España que de 60 autores estudiados, 42 promueven la ciudad compacta como la mejor alternativa de sustentabilidad, mientras que diez promueven la ciudad dispersa y ocho se muestran relativamente imparciales. Aunque la mayoría de estos autores defienden el paradigma de la ciudad compacta, también advierten sobre la necesidad de flexibilizar el modelo y lograr la densidad adecuada para cada ciudad. Por su parte, Barton, Melia y Parkhurst (2011) subrayan que una ciudad compacta es sustentable si existen medidas interrelacionadas sumadas a la densificación.

Según Howley, Scott y Redmond (2009) la calidad de la vivienda, las condiciones ambientales, la percepción de seguridad, las consideraciones de accesibilidad, la interacción e involucramiento en el barrio influyen en los niveles de satisfacción de la población en las zonas urbanas compactas. Lo que más preocupa en este modelo de ciudad es la basura, la polución, el ruido, la congestión vehicular, la falta de verde, de servicios y de equipamientos como el espacio abierto, el parqueo seguro y la infraestructura para niños. Bajo estas observaciones, para que la ciudad compacta sea realmente sustentable, la densificación debe ir acompañada de otras medidas referidas no solo al tipo de ocupación del suelo, sino a factores sociales y ambientales.

¿Cómo valorar la sustentabilidad urbana incluyendo las variables relevantes para el caso ecuatoriano? Existen diversos sistemas de valoración general del desarrollo sustentable, sin embargo, la descripción de indicadores de sustentabilidad urbana son relativamente recientes (Segnestam, 2003). De los sistemas de medición revisados se han identificado cuatro grupos. El primer grupo propone la evaluación de un modelo urbano específico: el de ciudad compacta utilizando, por un lado, indicadores que miden el grado de concentración o dispersión, la densidad de las viviendas y de los habitantes (Ding, et al., 2013; Tsompanoglou y Photis, 2013), o la influencia del mercado inmobiliario (Thorpe, et al., 2009), y por otro lado, valorando la sustentabilidad de distintos tipos de tejido (Kennedy, et al., 2014; Bourdic, Sala, y Nowacki, 2012). El segundo grupo enfatiza uno de los componentes de la sustentabilidad,

Metodología

como el social (Wong, 2015), el energético (Kennedy, et al., 2014; Yang, et al., 2013) o el ambiental (Escobar, 2006). El tercer grupo propone indicadores pensados para la toma de decisiones y referidos al manejo del suelo (Petrov, et al., 2013), o que intentan simular la incidencia de diversos actores (Olazabla, et al., 2010). En un último grupo se encuentran aquellos sistemas que integran distintas temáticas: desarrollo económico, desarrollo social, medio ambiente, infraestructura, densidad, brecha urbano-rural, entre otras y, además, proponen compilar los indicadores en índices sintéticos (Zheng y Wei, 2014). Las experiencias analizadas reflejan dos puntos críticos que ninguno de los sistemas mencionados aborda de manera simultánea: a) la importancia de construir un sistema de indicadores diversos que recoja la complejidad de la ciudad y pueda condensarse en un índice sintético, y b) la necesidad de mostrar la dimensión espacial de los resultados para comparar diversos tejidos urbanos.

Asumiendo como válido y pertinente el modelo de ciudad compacta, en este artículo proponemos un sistema de indicadores de evaluación de la sustentabilidad de la densificación urbana en ciudades ecuatorianas, así como una metodología para analizar la dimensión espacial de esos indicadores. Esta propuesta se basa en el *Sistema de indicadores y condicionantes para ciudades grandes y medianas* (Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, 2009) y en el *Plan especial de indicadores de sustentabilidad ambiental de la actividad urbanística de Sevilla* (Rueda, 2008), los cuales, han sido adaptados para asumir la complejidad y las particularidades de las ciudades ecuatorianas.

El sistema propuesto evalúa cuatro ejes que guardan relación con aquellos expuestos en los trabajos mencionados. El primer eje, compacidad, mide la densidad urbana, el tipo de ocupación, el reparto del viario público, la proximidad a las redes de transporte alternativo al automóvil, la accesibilidad peatonal, el porcentaje de condominios cerrados y de espacio libre. El segundo eje, diversidad de usos, mide la complejidad y el equilibrio de actividades, el comercio cotidiano, y la continuidad espacial y funcional de la calle. El tercer eje, verde urbano, mide la permeabilidad del suelo, el volumen de verde público, la superficie verde y la población servida por áreas verdes. El cuarto eje, integración socio-espacial, mide la dotación de equipamientos, el nivel de carencias y la cohesión social.

El sistema propuesto busca resolver los desbalances detectados en las metodologías estudiadas y permite obtener un índice sintético de densidad sustentable en el que se incluyen las variables más significativas. Además, posibilita la visualización de los resultados en el espacio, facilitando el análisis comparativo entre varios tejidos de una misma ciudad o de urbes diferentes.

El supuesto básico detrás del enfoque metodológico es que la densificación será sustentable si logra producir un espacio urbano compacto, diverso, verde y equitativo. La propuesta debe entenderse como un producto en construcción que intenta aportar al debate sobre la sustentabilidad urbana en Ecuador y en Latinoamérica.

La metodología aplicada puede resumirse en: 1) construcción de un sistema de indicadores, 2) selección de un área piloto de estudio, 3) levantamiento de información primaria y secundaria, e 4) implementación del modelo de evaluación.

Para representar espacialmente los resultados se trabajó con una malla cuadrangular de 200m de lado, donde cada celda fue evaluada a través de los cuatro ejes propuestos. La utilización de una malla regular busca evitar el problema de la unidad de área modificable (MAUP) (Openshaw, 1981), al mantener una superficie uniforme para cada unidad analizada. Para establecer el tamaño de la celda se realizó un análisis de sensibilidad incorporando consideraciones empíricas basadas en el tamaño promedio de una manzana, permitiendo que cada celda incluyera aproximadamente cuatro manzanas en promedio. Se utilizaron sistemas de información geográfica (GIS) y técnicas de análisis espacial para generar la malla e implementar el modelo de evaluación geo-espacial.

Construcción de un Sistema de Indicadores

La implementación del modelo de evaluación requiere construir un sistema de indicadores en los cuatro ejes propuestos. Para esto, se revisaron 52 indicadores planteados por la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona (Rueda, 2008), de los cuales, se seleccionaron 15, y se adaptaron a la realidad física y cultural de Cuenca, Ecuador. Adicionalmente, se incorporaron cuatro indicadores nuevos indispensables para un diagnóstico local. Los detalles del proceso de selección y adaptación de indicadores pueden consultarse en el informe del proyecto de investigación *Modelos de Densificación Territorial para las zonas consolidadas de la ciudad de Cuenca* (Hermida, et al., 2014). A continuación se presentan los 19 indicadores desarrollados agrupados por eje y una breve descripción de cada uno. Se señalan con un asterisco (*) los indicadores derivados de la metodología de la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona (Rueda, 2008). Todos los indicadores son calculados para cada celda de la malla de análisis.

Eje: compacidad (C)

*C_01 Densidad Urbana de Viviendas**: mide la densidad neta de viviendas por hectárea. Para su cálculo se utiliza el número de viviendas (VI) y la superficie efectiva neta (s_e) que es la superficie total menos la superficie destinada a vías y equipamientos mayores y menores.

$$\text{Densidad urbana e viviendas} = \frac{VI}{s_e}$$

C_02 Densidad de Habitantes: mide la densidad neta de población calculada como el número de personas (P) dividido para la superficie efectiva neta (s_e). Pone de manifiesto las tendencias de consumo del suelo residencial y puede ser indicador indirecto del potencial de movilidad y de la demanda de productos y servicios.

$$\text{Densidad de Habitantes} = \frac{P}{s_e}$$

*C_03 Compacidad Absoluta**: mide la intensidad edificatoria, equivalente al volumen edificado (v_e) dividido la superficie total (S). Valores altos de compacidad corresponden a zonas con procesos intensos de edificación, generalmente relacionados con construcciones en altura. Al no tener acceso a datos de altura de cada edificación, este valor puede estimarse a partir del número de pisos de la edificación multiplicado por 3m.

$$\text{Compacidad Absoluta} = \frac{v_e}{S}$$

*C_04 Reparto del Viario Público Peatonal**: mide el porcentaje del viario destinado al peatón ($vppe$) con respecto al total del viario público (VP), considerando que los espacios que restringen el automóvil son favorables para actividades de vida en comunidad y repercuten directa y positivamente en la calidad de vida. Para el cálculo se toman en cuenta todos los espacios transitables como ciclovías, vías vehiculares, medianas, franjas de parqueo, aceras y calles peatonales transitables únicamente a pie.

$$\text{Reparto del Viario Público Peatonal} = \frac{vp_{pe}}{VP} \times 100$$

*C_05 Proximidad a Redes de Transporte Alternativo**: mide el porcentaje de la población con acceso simultáneo a tres o más redes de transporte alternativo al automóvil particular (pt) como bus, tranvía, ciclovías o caminos peatonales. Se considera que la población tiene acceso a una red de transporte si su vivienda se encuentra dentro del área de influencia de dicha red, tomando como referente un radio de cobertura de 300m para bus, ciclovías y senderos peatonales, y de 500m para tranvía. Las áreas con alta accesibilidad permitirían disminuir la dependencia del vehículo privado, reduciendo la intensidad del tráfico local.

$$\text{Proximidad a Redes de Transporte Alternativo} = \frac{p_t}{p} \times 100$$

*C_06 Accesibilidad del Viario Público Peatonal**: mide qué tan accesible es el viario público de acuerdo a las condiciones físicas (pendiente) y ergonómicas (ancho) de las aceras, asumiendo que la combinación de ambas características permite o limita los desplazamientos de personas con movilidad reducida. Se calcula como el porcentaje de superficie de viario con accesibilidad igual o mayor a "suficiente" ($vpac$) con respecto a la superficie total del viario público (VP). La condición de suficiencia se cumple cuando la pendiente es menor o igual al 5% y una de las aceras es mayor o igual a 0.90m de ancho.

$$\text{Accesibilidad del Viario Público Peatonal} = \frac{vp_{ac}}{VP}$$

*C_07 Porcentaje de Condominio Cerrado**: mide la proporción del área de condominios cerrados (s_{cc}) con respecto a la superficie total de manzanas (s_m). Los condominios cerrados causan fragmentación y segregación espacial al dificultar las interacciones sociales y crear un acceso diferenciado al espacio urbano. Su cálculo considera la sumatoria de las superficies de los lotes dentro de los condominios cerrados con relación a la superficie total de los predios.

$$\text{Porcentaje Condominio Cerrado} = \frac{s_{cc}}{s_m} \times 100$$

C_08 Porcentaje de Área de Predios Vacíos: mide la reserva de espacio libre al interior de la manzana que puede utilizarse para la continuidad espacial y permeabilidad del espacio público. Representa la proporción de área de predios sin edificación (s_o) con respecto al área total de manzanas (s_m). Se considera un predio sin construcción cuando más del 50% de su superficie está dedicada a la agricultura, a espacios deportivos, a parques o está vacío.

$$\text{Porcentaje de Área de Predios Vacíos} = \frac{s_o}{s_m} \times 100$$

Eje: diversidad de usos (U)

*U_01 Complejidad Urbana**: mide el grado de complejidad urbana con base en la Teoría de la Información, esto es la cantidad y la diversidad de entidades portadoras de información en un mismo espacio, es decir, el número de actividades terciarias. Las zonas con mayor complejidad indican un alto número de actividades diferenciadas y, consecuentemente, un alto potencial social y económico, así como la cercanía potencial de diversas actividades. El cálculo se basa en la fórmula de Shannon, donde p_i es la proporción del número de actividades terciarias de tipo i en cada celda de análisis y n es el número de diferentes tipos de actividad en la misma celda (Rueda, 2008).

$$\text{Complejidad Urbana} = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

*U_02 Relación entre Actividad y Residencia**: mide la relación entre el espacio dedicado a actividades lucrativas no residenciales (s_c) y el número de viviendas (VI). La proximidad y convivencia entre estos dos tipos de actividades permite equilibrar la variedad y el uso del espacio urbano. Este indicador se relaciona, además, con la capacidad de autocontención de un territorio en términos de movilidad, ya que una relación equilibrada disminuiría la cantidad de desplazamientos necesarios.

$$\text{Relación entre Actividad y Residencia} = \frac{s_c}{VI}$$

*U_03 Actividades Comerciales Cotidianas**: mide la cobertura simultánea de actividades comerciales cotidianas, es decir, aquellas que requieren un acceso frecuente, por lo que deben encontrarse cerca de las viviendas (máximo 300m). Las áreas con cobertura de estas actividades son especialmente aptas para ser habitadas e incentivar los desplazamientos a pie. Para el cálculo se considera el porcentaje de superficie con cobertura simultánea de estos servicios (s_{act}) con respecto a la superficie total (S).

$$\text{Actividades Comerciales Cotidianas} = \frac{s_{act}}{S}$$

*U_04 Continuidad Espacial y Funcional de la Calle Corredor**: mide el grado de interacción en los tramos de calle según dos criterios: el espacio destinado al tránsito peatonal y la densidad de actividades terciarias. Esta interacción está relacionada con los flujos e itinerarios peatonales, la conexión de usos y personas y la calidad del espacio público. Se evalúa considerando el porcentaje destinado al ciudadano a pie y a la densidad de actividades terciarias cada 100m. Cada tramo del viario se clasifica en niveles de interacción y el indicador se calcula como la proporción entre el total de metros de tramo con valores de interacción "Alta" y "Muy Alta" (e_i) (correspondiente al 25% o más de superficie destinada al ciudadano a pie y más de cinco actividades cada 100m), y el total de metros de tramo E .

$$\text{Continuidad Espacial Y Funcional de la Calle Corredor} = \frac{e_i}{E}$$

Eje: verde urbano (V)

*V_01 Permeabilidad del Suelo Público**: mide la cantidad de superficie permeable del suelo público. Este indicador juega un papel importante en el sostenimiento de los ciclos naturales, el desarrollo de los ecosistemas urbanos y la circulación de agua superficial. Aunque idealmente se debería considerar todo el suelo urbano, la dificultad de acceder a los datos de los predios privados solo permite calcularlo para el suelo público. El cálculo se evalúa como la sumatoria del área de cada sección de espacio público (a_i) por su factor de permeabilidad (f_i), dividida para el área total de espacio público (A_t). El factor de permeabilidad es 1 para superficies permeables, 0,5 para semipermeables y 0 para impermeables.

$$\text{Permeabilidad del Suelo Público} = \frac{\sum a_i f_i}{\sum A_t}$$

*V_02 Superficie Verde por Habitante**: mide la relación entre el espacio verde público (s_v) y la población (P). Se considera superficie verde pública a todas las áreas de la ciudad con cobertura vegetal a las cuales cualquier ciudadano puede acceder libremente. No solo incluye las áreas intervenidas o diseñadas, sino las márgenes de los ríos y otros espacios no intervenidos.

$$\text{Superficie Verde por Habitante} = \frac{s_v}{P}$$

*V_03 Volumen de Verde en el Espacio Público**: mide la fracción de espacio ocupada por la vegetación, identificando los tramos y espacios públicos en los que el volumen de verde es insuficiente. La presencia de vegetación en el espacio público mejora su calidad, contrarrestando los efectos de la contaminación, proyectando sombra y protección al suelo, y aumentando la calidad del paisaje urbano. Su cálculo se basa en la suma de los volúmenes de copa de los árboles presentes en cada tramo (v_a), dividido entre el volumen total del tramo (V_t) considerando una altura de 8m. Los árboles se categorizan en cuatro clases según su tamaño y especie, y se les asignan volúmenes estandarizados.

$$\text{Volumen de verde en el espacio público} = \frac{\sum v_a}{\sum V_t}$$

*V_04 Proximidad Simultánea a Áreas Verdes**: mide el porcentaje de superficie urbana servida por tres tipos de espacio verde (*sav3*) con respecto a la superficie total (*S*). La distancia de la cobertura depende del tipo de área verde, siendo 200m para parques comunales, 750m para parques barriales y 2km para parques urbanos. La relación de proximidad a estos espacios permite revelar el nivel de integración de la red verde urbana, la misma que es fundamental para el mantenimiento de la biodiversidad y de la estructura funcional del espacio público.

$$\text{Proximidad simultánea áreas verdes} = \frac{S_{av3}}{S} \times 100$$

Eje: integración socio-espacial (S)

*S_01 Dotación de Equipamientos**: mide el porcentaje de población que tiene acceso simultáneo a equipamientos como centros de educación primaria y pre-primaria, culturales, de salud y deportivos. La accesibilidad a estos es clave para cubrir necesidades y promover la cohesión social. Las áreas de cobertura están determinadas por los radios de influencia de cada tipo de equipamiento (primaria y pre-primaria: 500m; salud: 1200m; cultural: 400m; recreativo: 1000m). El indicador calcula el porcentaje de superficie con cobertura simultánea de estos equipamientos (*seq*) con respecto al total de la superficie (*S*).

$$\text{Dotación de Equipamientos} = \frac{S_{eq}}{S} \times 100$$

S_02 Porcentaje de Viviendas con Carencias: mide el porcentaje de viviendas que se encuentran en condiciones de carencia (*vc_i*) con respecto al total de las viviendas de la celda (*V_i*), determinado con base en el Índice de Condiciones de Vida (ICV) (Osorio, 2013). Este indicador evidencia el déficit en la satisfacción de las necesidades de la población, tomando en consideración cuatro elementos: la calidad de la vivienda, los servicios públicos, la educación y el acceso a los servicios de salud. Para su cálculo se asigna a cada vivienda un valor de ICV entre 0 y 2, y se clasifican como carentes aquellas viviendas con un ICV menor a 0.95 (Orellana y Osorio, 2014).

$$\text{Porcentaje de Viviendas con Carencias} = \frac{vc_i}{V_i} \times 100$$

S_03 Segregación Espacial: este es un fenómeno urbano complejo y su medición requiere un enfoque multidimensional (Orellana y Osorio, 2014). Se propone el cálculo a través del Índice de Segregación Espacial Local (ISEA) (Buzai, et al., 2003), que permite medir la exposición de un grupo poblacional determinado, en este caso, las viviendas en el cuartil Q1 según el ICV. Su cálculo representa el ratio entre la proporción del número de viviendas Q1 en la celda con respecto al número total de viviendas Q1 en el área de estudio (*viQ1_i/viQ1*) y la proporción del total de viviendas en la misma celda (*V_i/V*). El resultado permite apreciar situaciones de exclusión (valores menores a 1) y segregación (valores mayores a 1). Los valores cercanos a 1 indican la inexistencia de segregación espacial.

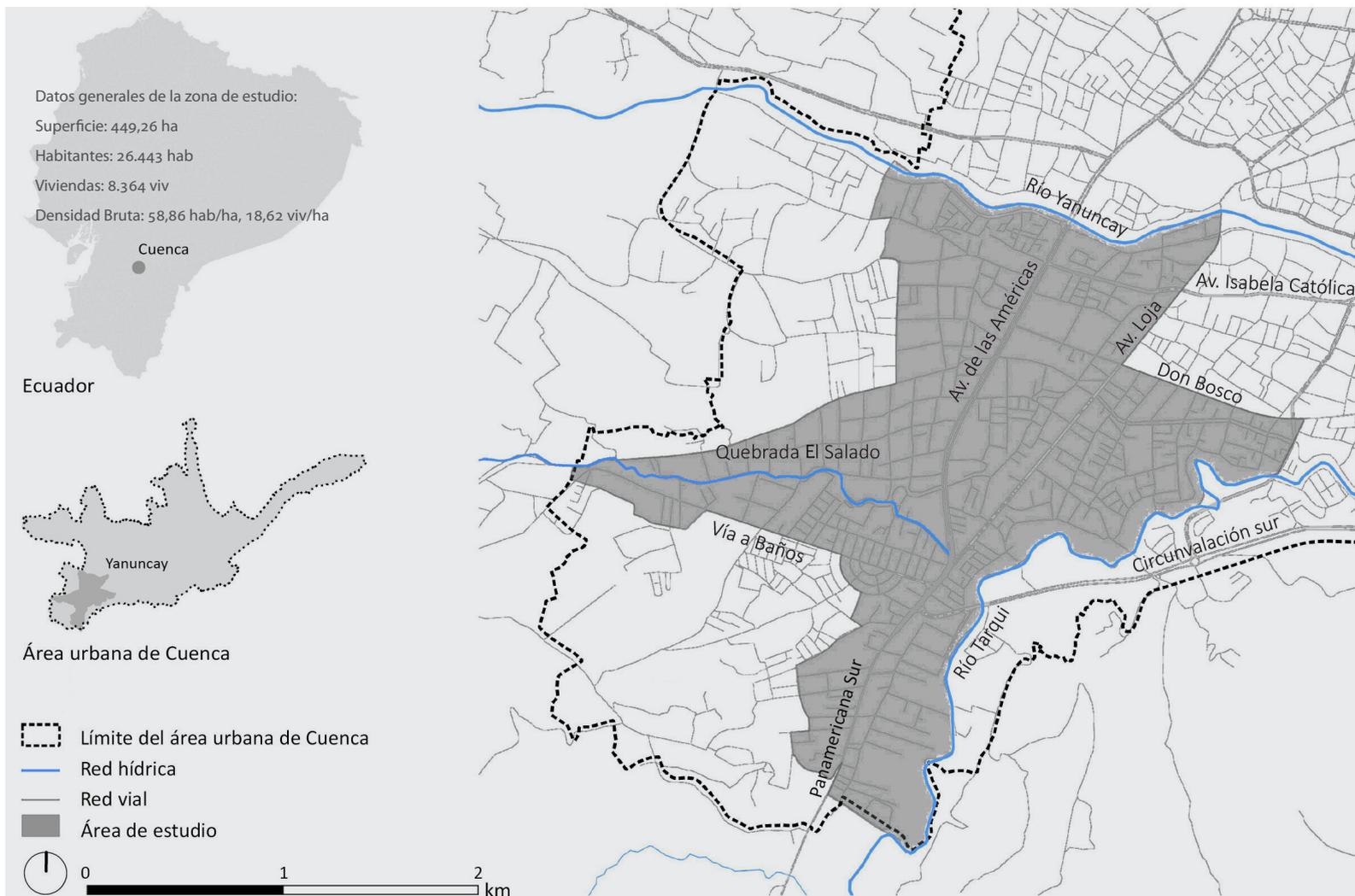
$$\text{Segregación Espacial} = \frac{\frac{viQ1_i}{viQ1}}{\frac{V_i}{V}}$$

Selección de un área piloto de estudio

Para estudiar la viabilidad del sistema propuesto se realizó un estudio piloto en la ciudad de Cuenca, capital de la provincia del Azuay y tercera ciudad del Ecuador, con una población de 332.000 habitantes y una superficie de 7.300 ha. Cuenca se asienta sobre la ciudad prehispánica de Tumipampa, en un valle regado por cuatro ríos y una serie de quebradas menores de la Cordillera de Los Andes, a 2.550 msnm. Su centro histórico fue declarado Patrimonio de la Humanidad por la Unesco en 1999.

Dentro del área urbana de Cuenca se eligió el sector de Yanuncay hacia el sur (véase la Figura 1). La selección del sitio se basó en criterios de densidad, posibilidades de consolidación y patrones de crecimiento. Esta zona se encuentra a las afueras de la ciudad, caracterizada por una densidad baja, con un alto número de lotes vacíos y con posibilidades de densificación. Además, está planificado que por este sector circule parte de la primera línea del nuevo sistema de Tranvía de Cuenca. Para determinar los límites del área de estudio se utilizó la delimitación de los sectores de planeamiento urbano (Concejo Cantonal de Cuenca, 2002).

Figura 1: Área de estudio



Fuente: elaboración propia con base en el catastro municipal de Cuenca (GAD Municipal de Cuenca, 2012).

Levantamiento de información primaria y secundaria

La información para la elaboración de los indicadores se recogió a partir de fuentes secundarias disponibles y de los datos primarios recogidos en campo (véase la Tabla 1).

Tabla 1: Datos requeridos para el cálculo de los 19 indicadores propuestos

Unidad	Información requerida	Fuentes
Predio	Código catastral	Catastro municipal
	Superficie del predio y de la construcción	Visitas de campo
	Número de pisos	
	Usos en planta baja y proporción	
	Usos en otras plantas y proporción	
	Porcentaje de condominio cerrado	
Tramo	Superficie del tramo y área dedicada al peatón	Visitas de campo
	Ancho y pendiente de aceras	
	Permeabilidad del pavimento	
	Superficie verde	
	Ubicación de árboles y tipo	
	Ubicación de paradas de buses y de tranvía	
	Trazado de ciclovías y senderos peatonales	
Manzana	Número de viviendas y habitantes	Censo Nacional de Población y Vivienda
	Características socioeconómicas de la población	

Fuente: elaboración propia. Para digitalizar la información e integrarla en una base de datos geográfica se utilizaron los programas CAD y SIG.

Implementación del modelo de evaluación

Para la implementación del modelo se desarrolló un conjunto de geoprocursos de análisis espacial utilizando SIG y se implementaron modelos de automatización que serán publicados en la siguiente etapa de la investigación con una licencia de uso libre. Cada geoprocuro toma como datos de entrada la malla de análisis, las capas de datos geográficos y las tablas alfanuméricas necesarias, y entrega como resultado los valores del indicador referenciados a cada celda. Se incluyeron niveles de personalización en algunos parámetros del modelo de manera que puedan ser ajustados a otras áreas. Cada modelo generó un mapa con la valoración del indicador correspondiente, obteniendo en total 19 mapas.

Resultados y Discusión

Evaluación de los indicadores

La Figura 2 muestra los resultados de la evaluación de ocho de los 19 indicadores mapeados.

En general, un porcentaje alto de celdas se encuentran por debajo del valor óptimo determinado con base en los estudios del proyecto *Modelos de Densificación Territorial para las*

Tabla 2: Resultados obtenidos por indicador

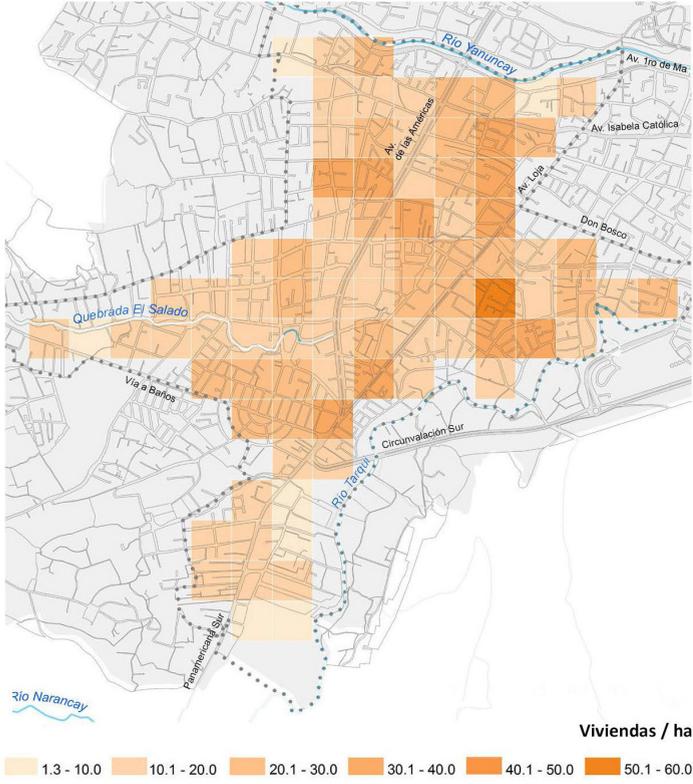
INDICADOR		Valor óptimo propuesto	% celdas con valor óptimo
Compacidad			
C_01	Densidad Urbana de Viviendas	>40viv/ha	1,2
C_02	Densidad de Habitantes	>120hab/ha	1,2
C_03	Compacidad Absoluta	>5m	0,0
C_04	Reparto del Viario Público Peatonal	>75%	0,0
C_05	Proximidad a Redes de Transporte Alternativo	100%	0,0
C_06	Accesibilidad del Viario Público Peatonal	100%	2,4
C_07	Porcentaje de Condominio Cerrado	0%	16,5
C_08	Porcentaje de Área de Predios Vacíos	<30%	70,5
Diversidad de usos			
U_01	Complejidad Urbana	>4	18,8
U_02	Relación entre Actividad y Residencia	101-200m ² /viv	28,2
U_03	Actividades Comerciales Cotidianas	100%	5,9
U_04	Continuidad Espacial y Funcional de la Calle Corredor	100%	0,0
Verde urbano			
V_01	Permeabilidad del Suelo Público	>30%	16,5
V_02	Superficie Verde por Habitante	>15m ² /hab	20,0
V_03	Volumen de Verde en el Espacio Público	>30% (en 50%)	0,0
V_04	Proximidad Simultánea a Tres Tipos de Áreas Verdes	100%	10,6
Integración socio-espacial			
S_01	Dotación de Equipamientos	100%	0,0
S_02	Porcentaje de Viviendas con Carencias	0%	0,0
S_03	Segregación Espacial	0,76-1,25	48,2

Fuente: elaboración propia.

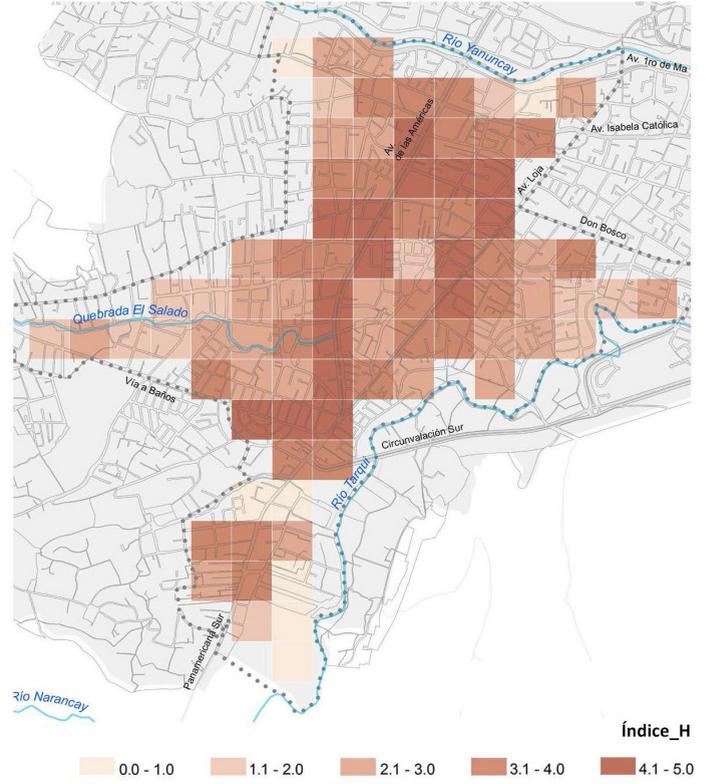
zonas consolidadas de la ciudad de Cuenca (Hermida et al., 2014) y de la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona (Rueda, 2008). Siete indicadores no tienen ninguna celda con valor óptimo y diez presentan menos de 5% de celdas en este rango. Los valores de sostenibilidad del sector son deficientes, especialmente en los ejes Compacidad e Integración Socio-espacial (véase la Tabla 2).

Los indicadores referidos a densidad y ocupación muestran que la zona de estudio posee baja densidad y ocupación, con un porcentaje significativo de predios vacíos. En cuanto al reparto del viario, el espacio destinado al ciudadano a pie es mínimo y poco accesible. Sobre la proximidad a redes de transporte alternativo, la dotación simultánea es nula.

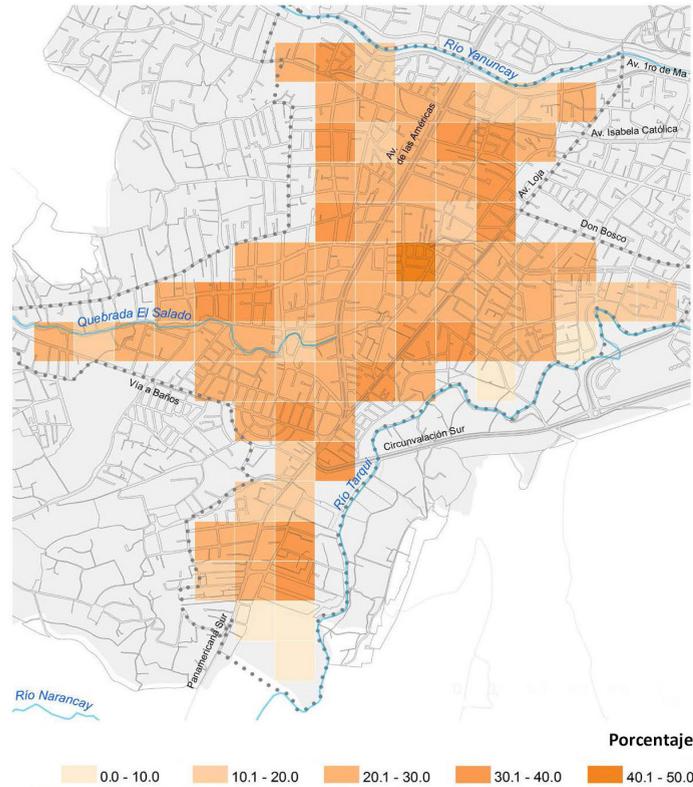
Figura 2: Valoración por indicadores



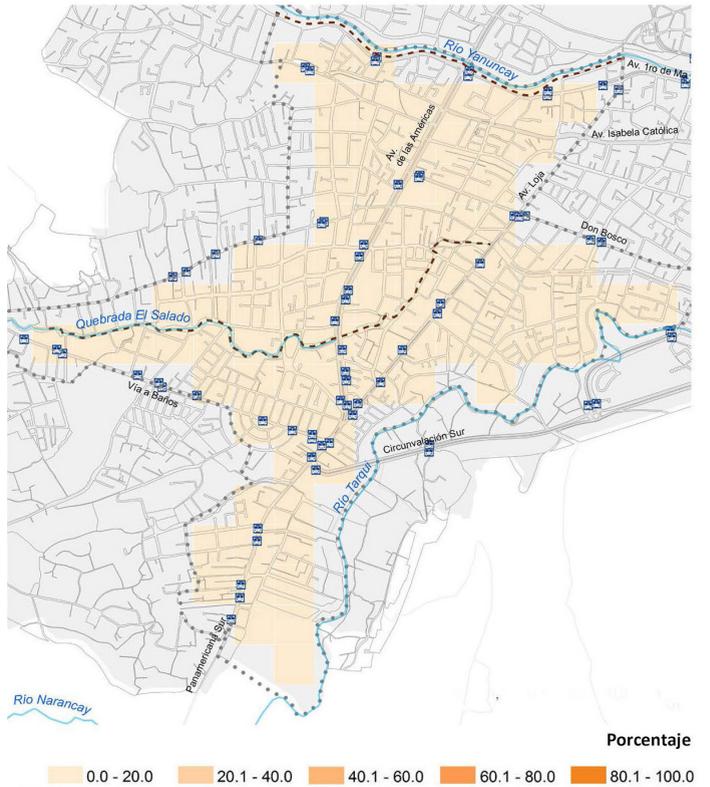
C_01 Densidad Urbana de Viviendas



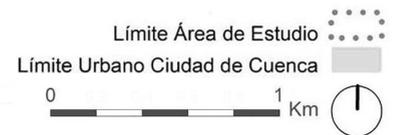
U_01 Complejidad Urbana

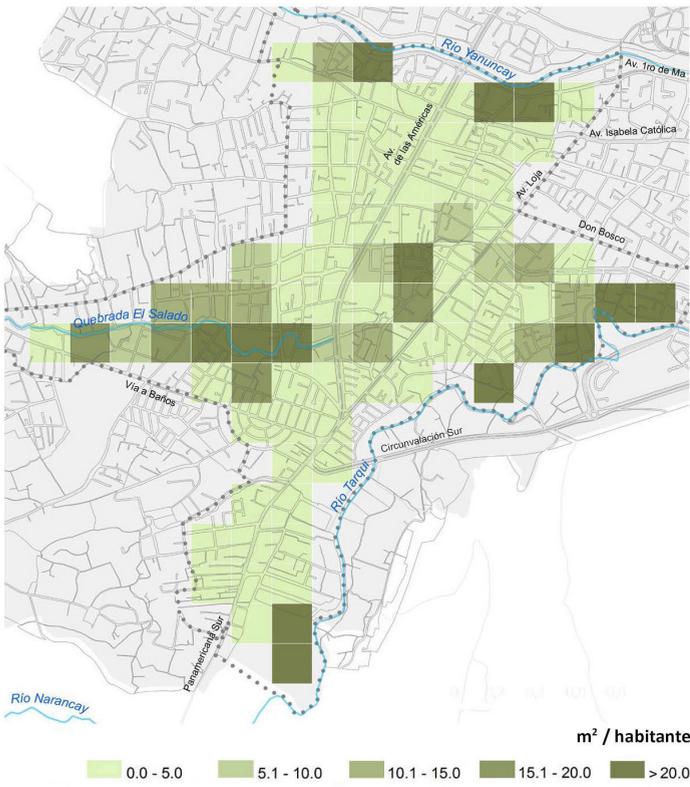


C_04 Reparto del Viario Público Peatonal

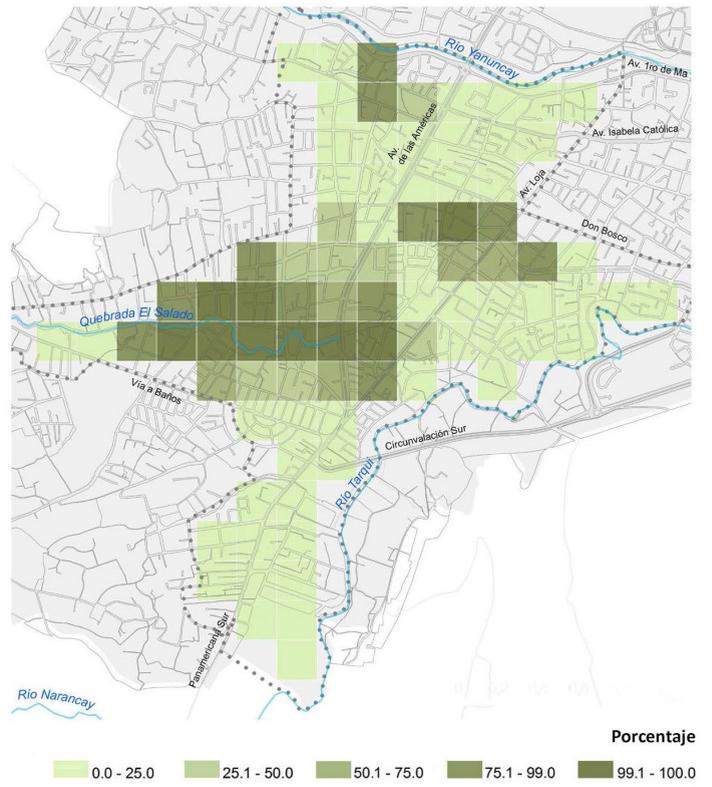


C_05 Proximidad a Redes de Transporte Alternativo

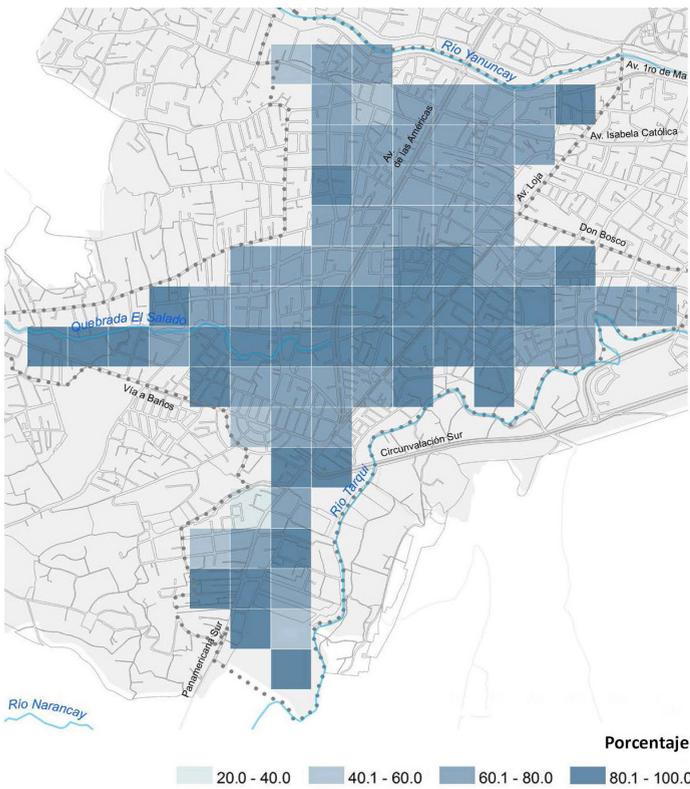




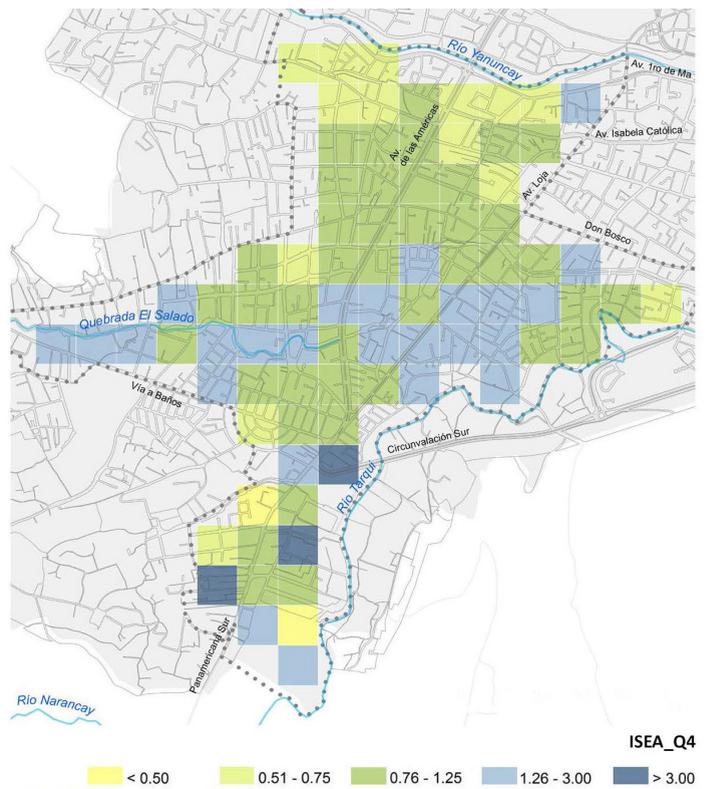
V_02 Superficie Verde por Habitante



V_04 Proximidad Simultánea a Tres Tipos de Áreas Verde

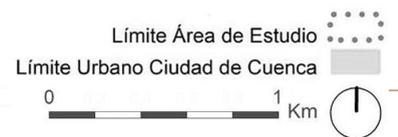


S_02 Porcentaje de Viviendas con Carencias



S_03 Segregación Espacial

Fuente: elaboración propia.



Otros ejes, como el de verde urbano y diversidad de uso presentan mejores porcentajes con relación al número de celdas con valores óptimos. Esta situación se debe, en el caso del verde urbano, a la presencia de márgenes de ríos y quebradas en la zona de estudio. En cuanto a la diversidad de uso, las vías de alta jerarquía que atraviesan el sector cuentan con una elevada variedad de actividades. En el eje de diversidad de uso se destaca la baja calificación del indicador de continuidad espacial y funcional de la calle corredor, eso se debe a que se considera no solo la variedad de actividades, sino el espacio destinado al ciudadano a pie, que como se observa en el eje de compacidad es deficiente.

Sobre los indicadores de integración socio-espacial, en dos de los tres indicadores ninguna celda cumple con el valor óptimo propuesto. Cabe señalar que uno de estos indicadores se refiere a las condiciones de vida de la población. Sin embargo, en cuanto al nivel de segregación espacial, la calificación mejora, aproximándose al 50% de celdas con valor óptimo, lo que indicaría que la mitad de la zona de estudio tiene un alto potencial de interacción social.

Patrones espaciales de los resultados

A partir del análisis visual de los mapas se han encontrado dos grupos de indicadores según su estructura espacial. En el primero se agrupan aquellos cuyos valores altos están asociados al trazado de las vías de mayor jerarquía (Av. de las Américas, Av. Loja, Don Bosco y Vía a Baños): *C_03 Compacidad Absoluta*, *C_08 Porcentaje de Área de Predios Vacíos*, *U_01 Complejidad Urbana*, *U_02 Relación entre Actividad y Residencia*, y *U_04 Actividades Comerciales Cotidianas*. Este patrón sugiere que la compactación y la diversidad de usos son mayores junto a las vías principales. Parecería que el carácter comercial de estas vías demanda cada vez más suelo para tales fines, incidiendo en el nivel de compactación, la altura y la cantidad de predios vacíos. El segundo grupo identificado corresponde a los indicadores cuyo patrón espacial está asociado a la presencia de márgenes de protección de ríos y quebradas: *V_01 Permeabilidad del Suelo Público*, *V_02 Superficie Verde por Habitante* y *V_04 Proximidad Simultánea a Tres Tipos de Áreas Verdes*. Resulta obvio que las celdas con mejor calificación se encuentran junto a las márgenes de protección de ríos y quebradas, sin embargo, no todas las celdas junto a estos cuerpos de agua tienen una valoración alta. El indicador de proximidad a tres tipos de áreas verdes es un caso especial pues la mejor calificación se concentra específicamente en la quebrada de El Salado.

Para los demás indicadores no ha sido posible identificar patrones espaciales. No obstante, se observa una relación entre ciertos procesos espaciales y los valores de determinados indicadores. Es necesario investigar los posibles factores de influencia, así como extender el estudio al resto de la ciudad y a otras ciudades para obtener mayores evidencias.

Hacia la construcción de un Índice de Densificación Urbana Sustentable

Con la finalidad de obtener una lectura global y realizar comparaciones se construyó un Índice sintético de Densificación Urbana Sustentable (IDUS), que representa el valor relativo de

sustentabilidad del tejido urbano en cuanto a su densidad. Se calcula a partir de cuatro subíndices: Diversidad Urbana (Du), Accesibilidad (Ac), Verde Urbano (Ve), Integración Social (Is).

$$IDUS = \frac{Du+Ac+Vu+Is}{4}$$

Cada subíndice sintetiza, a su vez, información clave de cada uno de los cuatro ejes estudiados, a partir de dos indicadores normalizados a valores entre 0 y 1:

Subíndice de Diversidad:

- U_01 Complejidad Urbana
- C_01 Densidad Urbana de Viviendas

Subíndice de Accesibilidad Peatonal:

- C_04 Reparto del Viario Público Peatonal
- C_05 Proximidad a Redes de Transporte Alternativo

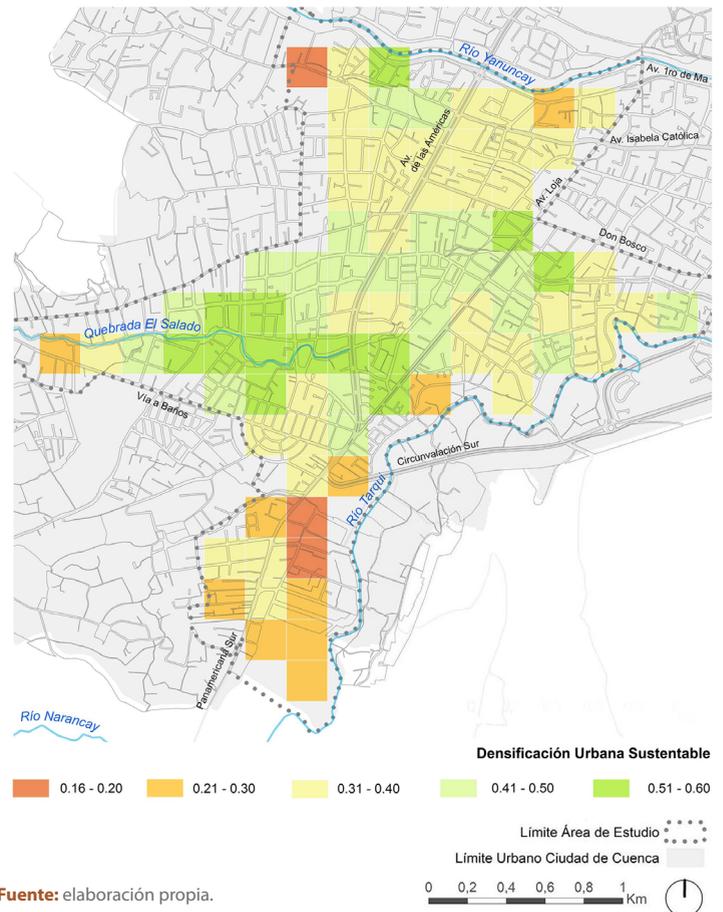
Subíndice Verde:

- V_02 Superficie Verde por Habitante
- V_04 Proximidad Simultánea a Tres Tipos de Áreas Verde

Subíndice de Integración Socio-espacial:

- S_02 Porcentaje de Viviendas con Carencias
- S_03 Segregación Espacial

Figura 3: Valoración del Índice de Densificación Urbana Sustentable



El IDUS presenta valores de 0 a 1, siendo 0 el grado más bajo de sustentabilidad y 1 el más alto. Los resultados del mapeo del índice muestran que ninguna de las celdas supera el 0,6 (véase la Figura 3). Además, el 84,5% de las celdas presenta rangos menores a la mitad del valor óptimo (0,5). Estos datos indican nuevamente que la calificación del sector de estudio es baja.

En la zona central, junto a la quebrada de El Salado, se concentran diez de las 13 celdas con mejor rango. Por otro lado, de las 13 celdas con los dos rangos más bajos, nueve se concentran al sur de la zona de estudio, en el sector menos consolidado. En la zona noroeste del área de estudio existen celdas próximas entre sí y con fuertes variaciones, evidenciando una alta heterogeneidad en el tejido urbano de la ciudad.

Conclusiones

Los resultados obtenidos reflejan las serias deficiencias en temas de densidad, ocupación, calidad del espacio público, viario peatonal, condiciones de vida, entre otras, y ponen de manifiesto la necesidad de repensar los modelos urbanos aplicados en las ciudades ecuatorianas en busca de alternativas más sustentables que permitan mejorar la calidad de vida de manera integral.

La metodología propuesta ha demostrado ser de gran valor para estimar el nivel de densificación sustentable de un área urbana. La automatización de los procesos de análisis de los datos permitió generar una serie de herramientas de análisis espacial que serán compartidas con otros investigadores e instituciones, quienes pueden implementar la metodología directamente una vez obtenida la información. Esta automatización permitiría evaluar programas y proyectos de intervención urbana en términos de sustentabilidad, y aportar a la discusión teórica sobre los factores que inciden en la construcción de ciudades más sustentables.

Las principales limitaciones encontradas tienen que ver con el esfuerzo asociado a la captura de datos de campo. Debido a la diversidad de los indicadores seleccionados, se requiere una gran cantidad de información que en el caso de las ciudades ecuatorianas no siempre está disponible y requiere ser levantada de forma directa. Más aún, tomando en cuenta que algunos indicadores abordan la proximidad espacial a ciertos elementos urbanos, se vuelve imprescindible recolectar datos en un perímetro externo al área de estudio para evitar la aparición de efectos de borde. La sistematización y organización de la información debe ser planificada adecuadamente desde el inicio del estudio para mantener coherencia con los formatos y modos de almacenamiento, y facilitar su posterior procesamiento.

En el caso de ciudades con catastros actualizados y completos será posible evaluar fácilmente toda la mancha urbana para establecer patrones y relaciones entre indicadores a escala de ciudad. De este modo se podrían detectar zonas con proble-

mas puntuales, identificar centralidades con mayor precisión y descubrir patrones espaciales que no siempre son evidentes. De no existir información de fuentes secundarias, se podrían llevar a cabo muestreos aleatorios estratificados de manera que se evalúen diferentes sectores de la ciudad.

La herramienta de análisis geográfico de sustentabilidad generada ha logrado automatizar el cálculo y mapeo de todos los indicadores. Estas herramientas serán compartidas con una licencia de uso abierto de manera que investigadores y gestores urbanos puedan utilizarla en procesos de valoración urbana que permitiría profundizar en el estudio de patrones espaciales urbanos en Ecuador y otros países.

El Índice de Densificación Urbana Sustentable se ha propuesto con la finalidad de obtener una calificación sintética que integre los indicadores más representativos y resuma el grado de sustentabilidad urbana, permitiendo una valoración rápida, reduciendo el número de indicadores de 19 a ocho, lo cual, facilita la obtención de información y amplía las posibilidades de replicar la metodología. Este índice permitiría, además, evaluar y comparar diferentes escenarios de densificación, así como los efectos de diferentes intervenciones urbanas.

La facilidad para el cálculo y el mapeo que este índice propone proporcionaría un diagnóstico rápido de la sustentabilidad urbana a nivel latinoamericano. Eso, a su vez, serviría como un insumo valioso en el análisis de la sustentabilidad urbana tanto a nivel académico como administrativo.

Los resultados de este trabajo han abierto nuevos retos de investigación que serán abordados en próximos pasos. Por un lado, se explorará la relación entre indicadores mediante técnicas de análisis multivariado que permitirán optimizar el número de indicadores, así como explorar con más precisión los patrones espaciales detectados. Por otro lado, se evaluarán diferentes enfoques para la construcción del IDUS, asignando pesos a cada subíndice para representar y evaluar diferentes enfoques de densificación.

Las reflexiones derivadas de este estudio podrían utilizarse en la formulación de nuevos proyectos de investigación que permitan aplicar, validar y mejorar la metodología propuesta, así como explorar las posibilidades que ofrece como herramienta de planificación y diseño urbano-arquitectónico. 

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad de Cuenca por el apoyo a esta investigación, en particular, a la Dirección de Investigación por el financiamiento del proyecto *Modelos de Densificación Territorial para las zonas consolidadas de la ciudad de Cuenca*, del cual, forma parte este trabajo. Igualmente agradecen a los investigadores, ayudantes de investigación y digitadores que participaron en el proyecto: C. Calle, P. Cordero, P. León, S. Vanegas, M. Guerrero, C. Abril y J. Salazar.

Bibliografía

- AGENCIA DE ECOLOGÍA URBANA DE BARCELONA. (2009). *Sistema de indicadores y condicionantes para ciudades grandes y medianas*. Consultado en: http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/3093A86A-128B-4F4D-8800-BE9A76D1D264/111504/INDI_CIU_G_Y_M_tcm7177731.pdf
- BARTON, H., MELIA, S. y PARKHURST, G. (2011). "The paradox of intensification". *Journal of Transport Policy*, 1 (18): 46-52.
- BOURDIC, L., SALA, S. y NOWACKI, C. (2012). "Assessing cities: A new system of cross-scale spatial indicators". *Building Research & Information*, 40: 592-605.
- BREHEMY, M. (1992). "The contradictions of the compact city: a review". En: Brehemy, M. (ed.), *Sustainable development and urban form*. Londres: Pion, pp. 138-159.
- BUZAI, G., et al. (2003). "Distribución y segregación espacial de los extranjeros en la ciudad de Luján. Un análisis desde la Geografía Cuantitativa". *Signos Universitarios*, 39: 29-52.
- DING, X. et al. (2013). "A novel indicator for assessing the spatial sustainability of cities in developing countries - a case study of Xi'an city". *Advanced Material Research*, 616-618: 1335-1342.
- ESCOBAR, L. (2006). "Indicadores sintéticos de calidad ambiental: un modelo general para grandes zonas urbanas". *Eure*, XXXII (96): 73-98.
- GAD MUNICIPAL DE CUENCA. (2012). *Catastro municipal de Cuenca*. Cuenca: GAD Municipal de Cuenca.
- HERMIDA, M. A., et al. (2014). *Modelos de Densificación Territorial para las zonas consolidadas de la ciudad de Cuenca*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- HOWLEY, P., SCOTT, M. y REDMOND, D. (2009). "Sustainability versus liveability: An investigation of neighbourhood, satisfaction". *Journal of Environmental Planning and Management*, 52 (6): 847-864.
- KENNEDY, C., et al. (2014). "Developing a multi-layered indicator set for urban metabolism studies in megacities". *Ecological Indicators*, 47: 7-15.
- MOLINÍ, F. y SALGADO, M. (2010). "Superficie artificial y viviendas unifamiliares en España, dentro del debate entre ciudad compacta y dispersa". *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 54: 125-147.
- CONCEJO CANTONAL DE CUENCA. (2002). *Reforma, actualización, complementación y codificación de la ordenanza que sanciona el Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca: determinaciones para el uso y ocupación del suelo urbano*. Cuenca: Municipalidad de Cuenca.
- OLAZABLA, M., et al. (2010). "Sustainable spatial management: An integrated approach". *Proceedings of the ICE-Municipal Engineer*, 163: 33-41.
- OPENSHAW, S. (1981). "The modifiable areal unit problem". *Quantitative geography a British view*, 38: 60-70.
- ORELLANA, D. y OSORIO, P. (2014). "Segregación socio-espacial urbana en Cuenca, Ecuador". *Análitika, Revista de Análisis Estadístico*, 8 (2): 27-38.
- OSORIO, P. (2013). *Las condiciones de vida de los hogares urbanos en Ecuador: una aproximación desde la urbanización y las necesidades humanas*. México D. F.: Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales.
- PETROV, L., et al. (2013). "Research article: Applying spatial indicators to support a sustainable urban future". *Environmental Practice*, 15: 19-32.
- RUEDA, S. (dir.). (2008). *Plan especial de indicadores de sustentabilidad ambiental de la actividad urbanística de Sevilla*. Consultado en: <http://www.ecourbano.es/imag/00%20DOCUMENTO%20ENTERO.pdf>
- SEGNESTAM, L. (2003). *Indicators of environment and sustainable development. Theories and practical experience*. Washington, D.C.: The World Bank. Consultado en: <http://siteresources.worldbank.org/INTEEI/936217-1115801208804/20486265/IndicatorsofEnvironmentandSustainableDevelopment2003.pdf>
- THORPE, N., et al. (2009). "Spatial development and the sustainability of urban areas". Hong Kong, 14th Hong Kong Society for Transport Studies (HKSTS) International Conference: Transportation and Geography.
- TSOMPANOGLIOU, S. y PHOTIS, Y. (2013). "Measuring urban concentration: A spacial cluster typology based on public and private sector service patterns". *World Review of Science, Technology and Sustainable Development*, 10 (4): 185-202.
- WHITE, R. (1994). "Strategic decisions for sustainable urban development in the Third World". *Third World Planning Review*, 16 (2): 103-116.
- WONG, C. (2015). "A framework for 'City Prosperity Index': Linking indicators, analysis and policy". *Habitat International*, 45: 3-9.
- YANG, D., et al. (2013). "Evaluating spatiotemporal differences and sustainability of Xiamen urban metabolism using emergy synthesis". *Ecological Modelling*, 272 (24): 40-48.
- ZHENG, L. y WEI, H. M. (2014). "Research of the evaluation of the sustainable development of Xi'an urbanization". *Applied Mechanics and Materials*, 587-589: 161-165.