

# ESTRUCTURAS ESPACIALES URBANAS Y EMISIONES DE CO<sub>2</sub> UN ANALISIS EMPÍRICO EN LAS CIUDADES DE 7 PAÍSES LATINOAMERICANOS

## URBAN SPATIAL PATTERNS AND CO<sub>2</sub> EMISSIONS

## AN EMPIRICAL ANALYSIS OF 7 LATIN AMERICAN COUNTRIES

---

Rafael Van Der Borgh<sup>1</sup> - Montserrat Pallares Barbera<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Universitat Autònoma de Barcelona – Departament de Geografia

---

vdb.rafael@gmail.com (ORCID: 0000-0002-4237-0996); Montserrat.Pallares@uab.cat

---

### Resumen

Las ciudades compactas son frecuentemente mencionadas como una opción para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, en los entornos urbanos de América Latina, una mayor densidad poblacional podría exacerbar los efectos de congestión que ya afectan algunas ciudades y producir impactos inciertos en las emisiones. Para entender mejor la relación entre emisiones de CO<sub>2</sub> y estructuras espaciales urbanas esta comunicación desarrolla un enfoque metodológico que combina rejillas poblacionales y emisiones de CO<sub>2</sub> espacialmente desagregadas con el fin de evaluar sistemáticamente las emisiones de 635 ciudades distribuidas en 7 países latinoamericanos. Usando un modelo de datos de panel con dependencia espacial se estiman luego las elasticidades de emisiones a nivel de ciudad. Se evidencia que cuando la población de una ciudad aumenta un 1%, sus emisiones de CO<sub>2</sub> se disparan un +2,48% *ceteris paribus*. Sin embargo, el impacto neto asociado al crecimiento poblacional depende de los patrones de expansión espacial de las ciudades: si el crecimiento poblacional se hace mediante densificación, el incremento de las emisiones es reducido en un 0.72% por cada aumento de un 1% en los niveles de densidad de la ciudad. Esto señala que, si los patrones de expansión espacial prevalecientes en las ciudades latinoamericanas no son alterados, las emisiones de las ciudades aumentarán casi dos veces más rápido que la población urbana.

**Palabras clave:** Emisiones urbanas, estructuras espaciales, ciudades compactas

### Abstract

Compact cities are frequently mentioned as an option to curb CO<sub>2</sub> emissions. However, in Latin America urban settings, higher population density could exacerbate congestion effects already affecting some cities, resulting in uncertain impacts on CO<sub>2</sub> emissions. To better understand the relationship between CO<sub>2</sub> emissions and ur-

ban spatial structures, a methodology combining population grids and spatially disaggregated CO<sub>2</sub> emissions is developed to systematically evaluate emissions at the city level. With a new dataset covering 635 cities across 7 countries, a panel data model with spatial dependence is then developed. Results show that when city's population is increased by 1%, its CO<sub>2</sub> emissions jump by +2.48%. However, the net CO<sub>2</sub> impact of this population growth depends on the spatial expansion patterns of cities: if this population growth is conducive to higher density levels, emissions are reduced by 0.72% for every 1% increase in city density levels. Without changes to the prevailing spatial expansion patterns of Latin American cities, CO<sub>2</sub> emission will increase almost twice as fast as urban population.

**Keywords:** urban emissions, spatial patterns, compact cities

## 1. CONTEXTO Y MOTIVACIÓN

Mientras que la mayoría de la humanidad ha vivido en zonas rurales y pequeños asentamientos urbanos desde la Antigüedad hasta el siglo XIX, en tan solo 200 años, más de la mitad de la población mundial ha pasado a vivir en zonas urbanas (UNDESA, 2018). En consecuencia, el suelo urbano se ha expandido masivamente, en particular durante el periodo 1970–2010 dónde ha crecido a nivel superior o igual al incremento de la población urbana en todas las regiones (Güneralp et al., 2020). Esta rápida evolución ha impactado el medio ambiente a través de un amplio rango de efectos que van desde la pérdida de tierras agrícolas (Chen et al. 2020) hasta la reducción de la disponibilidad de agua dulce (Mc Donald et al. 2019), o la destrucción de biodiversidad y sumideros de carbono (Seto et al., 2012). Sin embargo, las ciudades también han fomentado las economías de aglomeración y desempeñan un papel fundamental para mejorar la productividad y fomentar la innovación, lo que a su vez repercute positivamente en el desarrollo económico y social (Ahlfeldt y Pietrostefani, 2017). En las próximas décadas, se anticipa que el suelo urbano siga expandiéndose (Gao y O'Neill, 2020), consolidando así el papel de las zonas urbanas como motor principal del nexo entre medio ambiente y sociedad.

Para mantener el aumento de la temperatura muy por debajo de los 20C es necesario reducir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) en un 45% respecto a los niveles de 2010 para 2030 y alcanzar la neutralidad del carbono para 2050 (IPCC, 2018). La forma en que la humanidad se asiente durante la próxima década tendrá, por lo tanto, un impacto decisivo en las trayectorias de las emisiones globales. Las ciudades ya son responsables de alrededor del 75% del consumo mundial de energía primaria (UN Habitat, 2016). Sin embargo, el desempeño individual de las ciudades en términos de emisiones de carbono es muy heterogéneo. El desarrollo urbano compacto, por ejemplo, ha surgido como una opción que podría reducir las emisiones de GEI mediante la racionalización del consumo de energía, la optimización del transporte y la limitación de la expansión urbana.

En EE. UU., Lee y Lee (2014) han evidenciado que duplicar la densidad de población de las 125 mayores áreas metropolitanas supondría una reducción del 35% y el 48% de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la vivienda y del transporte, respectivamente. Un

análisis detallado del Área Metropolitana de Barcelona también ha revelado cómo la forma urbana es el principal impulsor de las variaciones de la huella ecológica entre los 163 municipios que la conforman (Muñiz y Galindo, 2005). Sin embargo, estudios recientes han adoptado un enfoque más amplio y han encontrado resultados matizados. Utilizando metodologías que desagregan espacialmente las emisiones nacionales a través de imágenes de luz nocturna captadas mediante satélites (NTL por sus siglas en inglés), Ou et al. (2019) han estudiado todas las ciudades de China continental y han encontrado que los beneficios de una mayor densidad en términos de emisiones de CO2 dependen del nivel de desarrollo de la ciudad. Utilizando un enfoque similar basado en el NTL, Zhou et Wang (2018) destacaron cómo el aumento del grado de acoplamiento entre estructuras urbanas y organización del tráfico –y no la densidad por sí sola– reducen las emisiones de CO2 a nivel de ciudad.

A nivel mundial, solo unas pocas ciudades disponen de inventarios de emisiones de GEI y estos suelen presentar alcances y coberturas diferentes, lo que dificulta la comparabilidad entre ciudades, regiones y países (Mia et al., 2019). Como resultado, el alcance de la literatura existente está limitado por escasez de datos, así como por cuestiones metodológicas relacionadas con la delimitación de las ciudades. Los estudios existentes que han recurrido a los datos de inventarios de emisiones a nivel de ciudad se han centrado en un conjunto reducido de ciudades que muestran patrones espaciales y niveles de desarrollo relativamente homogéneos. Por otra parte, los estudios más recientes que han utilizado imágenes satelitales para distribuir espacialmente las emisiones de carbono han limitado el alcance de su investigación a un solo país debido a la dificultad de comparar “ciudades” entre países: las zonas urbanas se definen a nivel nacional y los criterios varían significativamente entre geografías. La ausencia de un análisis internacional a gran escala de la relación entre estructuras espaciales urbanas y emisiones de CO2 en diferentes contextos socava nuestra comprensión de los principales impulsores de la eficiencia carbono en ciudades. También limita nuestra capacidad para informar las políticas de desarrollo urbano bajo en carbono en entornos con capacidades de gobernanza más débiles como, por ejemplo, América Latina.

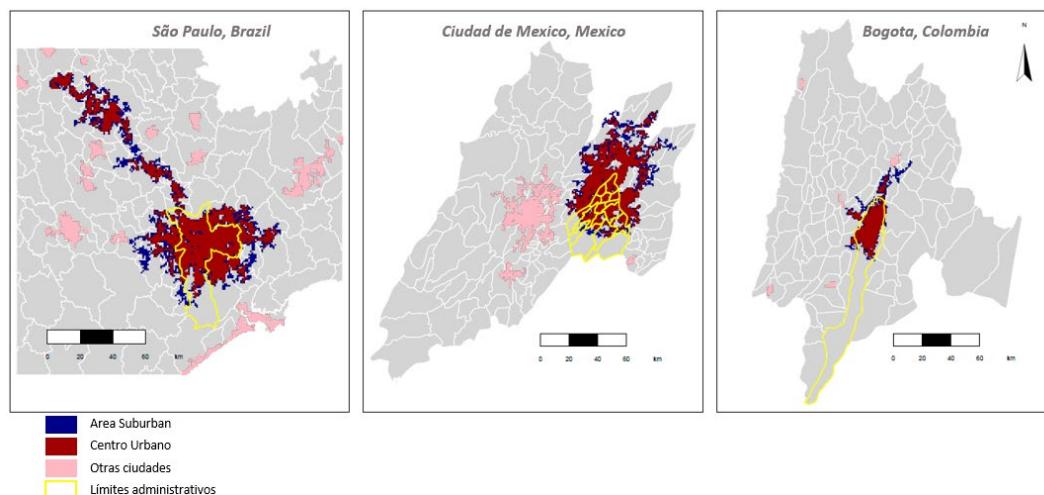
Para llenar este vacío, recurrimos a nuevas fuentes de datos derivadas de imágenes satelitales con el fin de desarrollar una metodología que nos permita evaluar sistemáticamente las emisiones urbanas. Este enfoque metodológico se detalla en la siguiente sección y es clave para subsanar las deficiencias de los estudios anteriores, ya que permite compilar métricas a nivel de ciudad en varios países, teniendo en cuenta tanto los centros urbanos como las zonas suburbanas de las afueras. Aplicamos esta metodología a siete países latinoamericanos (México, Brasil, Argentina, Chile, Perú, Ecuador y Colombia) que en conjunto representan el 76% de las emisiones de GEI de la región América Latina y el Caribe. Luego, construimos un modelo de panel espacial para cuantificar la relación entre estructuras espaciales urbanas y emisiones de CO2. Nuestros resultados muestran que, en promedio, cuando una ciudad latinoamericana aumenta su densidad un 10%, reduce sus emisiones de CO2 en un 7,2%. También exploramos la heterogeneidad de estos efectos en función del nivel de población de la ciudad y encontramos que los beneficios climáticos asociados a la densidad se reducen conforme aumenta la población de la ciudad. La sección 3 presenta los resultados de estos análisis estadísticos.

## 2. METODOLOGÍA

### 1.1. La definición de ciudades y las estructuras espaciales urbanas

Para poder evaluar si las estructuras espaciales urbanas tienen un impacto en las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel de ciudad, utilizamos primero el concepto de “grado de urbanización” para delimitar las ciudades de forma sistemática en todos los países (Dijkstra et al. 2020). Esta metodología ha sido respaldada por las Naciones Unidas en marzo de 2020 (UN Statistical Commission, 2020) para delinear zonas urbanas a nivel internacional. De acuerdo con esta metodología, los centros urbanos son clúster de población que cumplen con el doble criterio de una densidad mínima de 1.500 personas/km<sup>2</sup> y una población total de al menos 50.000 habitantes. Aquí consideramos que las ciudades están formadas por estos centros urbanos y sus áreas adyacentes semidensas, lo que pretende captar las áreas suburbanas y las afueras en el entorno inmediato de los centros urbanos. Calibramos un algoritmo con estas características y lo aplicamos a las rejillas poblacionales (i.e. *population grid*) del Global Human Settlements Population Layers (EU-GHSL) con una resolución de 1km<sup>2</sup> (proyección mundial de Mollweide) para los años 2000 y 2015 (ver Florczyk et al., 2019 para más detalle sobre esta rejilla). Disponer de una definición coherente de la extensión urbana permite comparar objetivamente las ciudades de los 7 países de interés para los años 2000 y 2015. Como se ilustra en la figura 1, este enfoque pone de manifiesto el desfase entre límites administrativos urbanos (en amarillo) y distribución de la población urbana (en rojo y azul). El uso de los límites administrativos sesgaría la evaluación de los patrones urbanos, mientras que el enfoque propuesto se basa la distribución espacial de la población, lo cual representa mejor la realidad socioeconómica y las interrelaciones funcionales de las ciudades. Por último, la inclusión de zonas urbanas semidensas adyacentes a los centros urbanos es una característica clave para captar los posibles efectos de deslocalización hacia las zonas periféricas relacionados con mayores niveles de densidad en los centros urbanos. Nuestra muestra final incluye 635 ciudades, que van desde pequeñas áreas urbanas (es decir, 50.000 personas en 2015, según la definición de “grado de urbanización”) hasta gigantescas megalópolis (más de 20 millones para Sao Paulo y Ciudad de México). En base a esta definición de ciudades caracterizamos sus estructuras espaciales mediante dos indicadores: (i) la densidad y (ii) la forma urbana. Estos indicadores definen colectivamente las estructuras espaciales urbanas.

**Figura 1.** Las ciudades según el “grado de urbanización” VS los límites administrativos



Fuente: Elaboración propia en base a EU-GHSL

La compacidad de las ciudades es usualmente evaluada a través de la densidad poblacional, que suele medirse como la relación entre población y superficie urbana total. Sin embargo, en este estudio, seguimos a Jedwab et al. (2021) y utilizamos la superficie construida (i.e. *built-up*) en lugar de la superficie urbana total para evaluar la densidad. Los datos de superficie construida se extraen del producto GHS-BUILT con una resolución de 1 km<sup>2</sup>, que proporciona una medida de la superficie construida en cada celda (como % de la superficie total, ver Florczyk et al., 2019). Optamos por la superficie edificada porque consideramos que es un mejor indicador que la superficie total de la ciudad para medir la “habitabilidad” asociada a un determinado nivel de densidad poblacional. De hecho, en contextos latinoamericanos, las ciudades que presentan una elevada relación personas/área reflejan dos realidades distintas: una primera en la que la alta densidad de población se asocia con numerosos edificios e infraestructuras, lo que presumiblemente produce niveles de densidad más “habitables”; una segunda en la que la alta densidad de población se combina con pocas estructuras construidas y/o de mala calidad –como puede ser el caso de los barrios marginales–, lo que sugiere un área superpoblada con niveles de densidad potencialmente menos habitables. El uso de la tradicional relación personas/área nos impediría diferenciar entre estos dos tipos de densidad. Con el fin de garantizar la robustez del análisis calculamos dos medidas de densidad, denominadas Densidad y “Densidad tradicional” (véase ecuaciones 1 y 2) pero usaremos el indicador basado en la relación personas/superficie construida como indicador de referencia.

$$Densidad_{i,t} = \sum \frac{Población_{i,t}}{Superficie\ construida_{i,t}} \quad (1)$$

$$Traditional\ Density_{i,t} = \sum \frac{Población_{i,t}}{Area\ total_{i,t}} \quad (2)$$

Otra característica espacial que puede influir en el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> de una ciudad es su forma. Las ciudades que experimentan una expansión urbana rápi-

da y mal planificada son más propensas a mostrar una forma compleja y/o accidentada. Las formas urbanas complejas pueden complicar el transporte urbano, ya que los desplazamientos urbanos tienden a concentrarse en torno a un menor número de nodos, lo que a su vez puede aumentar los efectos de la congestión y, en definitiva, las emisiones de CO<sub>2</sub>. No obstante, también se podría plantear la hipótesis de que las formas urbanas complejas son lo propio de ciudades policéntricas, en las cuales las necesidades de largos transportes de un lado a otro de la ciudad son menos necesarias, lo que *in fine* conduce a una reducción de las emisiones urbanas. Para evaluar el impacto de la forma urbana en las emisiones de CO<sub>2</sub> calculamos un índice de forma urbana (i.e. *shape index*) para cada ciudad de nuestra muestra. Este índice describe la relación entre el perímetro real de la ciudad y el perímetro mínimo hipotético de una ciudad de mismo tamaño según la ecuación 3. El perímetro mínimo es igual al perímetro de una ciudad totalmente cuadrada. El índice es igual a uno para las ciudades cuadradas de cualquier tamaño y aumenta sin límite con formas urbanas geométricamente más complejas (es decir, menos cuadradas).

$$\text{Índice de forma}_{i,t} = \frac{\text{Perímetro}_{i,t}}{\text{Perímetro Min.}_{i,t}} \quad (3)$$

Con el  $\text{Perímetro}_{i,t}$  el perímetro en metros de la ciudad y  $\text{Perímetro Min.}_{i,t}$  el perímetro de un área de mismo tamaño, pero perfectamente cuadrada.

Una última característica clave que determina en gran medida las estructuras espaciales urbanas es la capacidad de aplicar con éxito las políticas de planificación urbana. Dado que no disponemos de datos comparables sobre estas dimensiones en toda la muestra de nuestras ciudades, calculamos el PIB/cápita a nivel de ciudad como una aproximación a dimensiones como la capacidad reguladora e institucional, así como la calidad de la planificación urbana. Para ello, utilizamos la desagregación espacial del PIB proporcionada por Kummur et al. (2007) y superponemos nuestra capa de ciudades definida según nuestro enfoque basado en población con esta capa de PIB. El PIB a nivel de ciudad se obtiene mediante estadísticas zonales, sumando el PIB asociado a cada píxel que se encuentra dentro de los límites de cada ciudad.

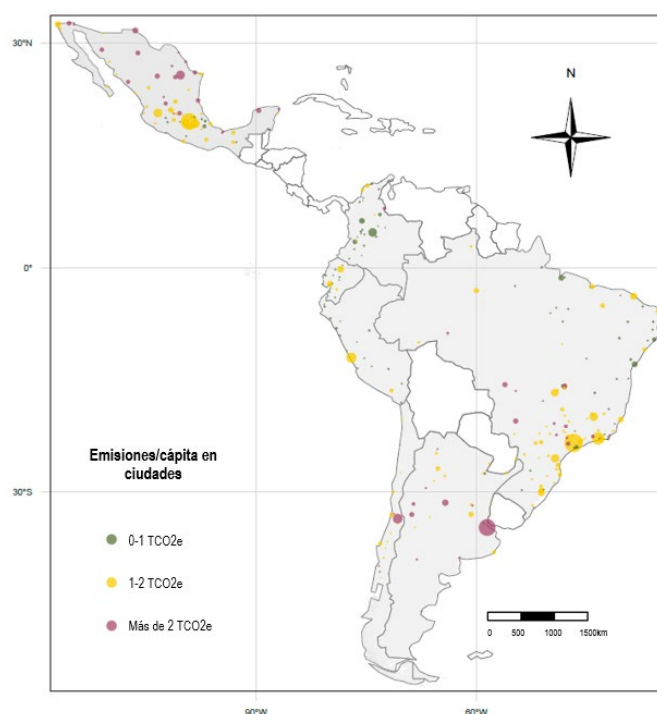
## 1.2. Las emisiones urbanas

En América Latina, al igual que a nivel global, la información proporcionada a través de los inventarios de emisiones de GEI a nivel de ciudad –cuando existe– es discontinua, de diferentes alcances y a veces inconsistente. En segundo lugar, la estimación de las emisiones de GEI a nivel de ciudad depende de la propia definición de ciudad. Los inventarios de emisiones de GEI de muchas ciudades se han realizado a partir de los límites administrativos de las ciudades y/o de las regiones metropolitanas que delimitan estas áreas urbanas. Como ya se ha mencionado, estos límites administrativos rara vez se corresponden con la realidad socioeconómica y las interrelaciones funcionales de las ciudades. Por lo tanto, el uso de inventarios limitaría significativamente el alcance de nuestro estudio y podría sesgar las estimaciones de las emisiones al no reflejar con exactitud la distribución espacial de la población.



Como metodología alternativa a los inventarios de emisiones, varios autores han utilizado imágenes de luz nocturna para desagregar espacialmente los inventarios nacionales de emisiones. Aprovechando este amplio cuerpo de literatura, aquí hacemos uso del producto ODIAC que distribuye espacialmente las emisiones de combustibles fósiles con una resolución de 1km<sup>2</sup> (Oda et al., 2018). Nuestra metodología estima las emisiones de las ciudades como aquellas que son producto de actividades alimentadas por combustibles fósiles que ocurren dentro de los límites de las ciudades. La figura 3 resume los niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita estimadas a nivel de ciudad según esta metodología.

**Figura 3.** Las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita estimadas para las ciudades de 7 países latinoamericanos



Fuente: Elaboración propia

Nota: solo se representan las ciudades de más de 120,000 personas; el tamaño del círculo es proporcional a la extensión espacial de la ciudad.

Las emisiones de las ciudades muestran una correlación espacial con un I de Moran global estimado en 0,14 en 2015 y significativo al nivel de confianza del 1% (basado en una matriz de vecinos que consideran las 5 ciudades más cercanas geográficamente). Esto confirma que las ciudades con un nivel similar de emisiones están situadas más cerca unas de otras. Además, realizamos un análisis del Indicador Local de Asociación Espacial (LISA por sus siglas en inglés) que revela un doble patrón de autocorrelación espacial local: la agrupación de ciudades con emisiones superiores a la media se distribuye principalmente a lo largo de las praderas del sur de Brasil y norte de Argentina y alrededor del valle central de México. Por otro lado, las ciudades con niveles de emisiones per cápita inferiores a la media se agrupan en la región andina a lo largo de la costa del Pacífico y en el norte de Brasil. Estos resultados recuerdan

la primera ley de la Geografía de Tobler, que afirma que “*todo está relacionado con todo, pero las cosas cercanas están más relacionadas que las lejanas*”. Tomar en cuenta esta dependencia espacial es crucial para desentrañar los impactos causales de las estructuras espaciales en las emisiones de CO<sub>2</sub> y asegurar estimaciones no sesgadas (Anselin, 1988).

### 3. ESTIMACIÓN DE LA RELACION ESTRUCTURA ESPACIAL URBANA Y EMISIONES DE CO<sub>2</sub>

Para evaluar el impacto de las estructuras espaciales en las emisiones de CO<sub>2</sub> de las ciudades, desarrollamos un modelo de panel espacial que se basa en el modelo STIRPAT (Impactos Estocásticos por Regresión sobre Población, Afluencia y Tecnología). Este modelo ha sido ampliamente utilizado y se inspira en la ecuación de Kaya (véase York et al., 2003, para una presentación detallada). En este caso, tratamos de explicar las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel de ciudad a través de la población de la ciudad, la afluencia de la ciudad (i.e. el PIB/cápita) y nuestro conjunto de indicadores sobre estructuras espaciales detallados en la sección anterior. Nuestro modelo tiene la siguiente forma:

$$\ln Y_{i,t} = \lambda \sum_{j \neq i} W_{ij} Y_{j,t} + \beta_1 \ln \text{población}_{i,t} + \beta_2 \ln \text{PIB/cap}_{i,t} + \beta_3 \text{Densidad}_{i,t} + \beta_4 \ln \text{forma urb.}_{i,t} + \omega_i + \varepsilon_{i,t}$$

$\ln Y_{i,t}$  denota el logaritmo natural de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la ciudad  $i$  en el año  $t$ ,  $W_{ij}$  la matriz de vecinos estandarizada por filas utilizada para calcular el retraso espacial de las emisiones de las ciudades y  $\lambda$  el parámetro de este retraso espacial, que refleja la fuerza y la dirección de la autocorrelación espacial entre una ciudad y sus vecinos geográficos indicada en la sección anterior.  $\ln \text{población}_{i,t}$  es la población transformada en logaritmos de la ciudad  $i$  en el año  $t$ , mientras que  $\ln \text{PIB/cap}_{i,t}$  representa el logaritmo natural del Producto Interior Bruto (PIB) per cápita de la ciudad  $i$  en el año  $t$ . Las estructuras espaciales urbanas se evalúan mediante la densidad y el índice de forma urbana, ambos transformados en logaritmos. Por último, son efectos fijos de ciudad que captan la heterogeneidad invariante no observada como por ejemplo las características geográficas, los factores culturales o las condiciones climáticas imperantes. Los efectos fijos de ciudad limitan el sesgo por variables omitidas y son primordiales para estimar un vínculo de causalidad. Como nuestras variables están transformadas en logaritmos, los parámetros estimados pueden interpretarse como elasticidades de las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel de ciudad.



**Tabla 1. Resultados de las estimaciones STIRPAT**

	Modelo de Panel Estático	Modelo de Panel Espacial	Panel Espacial (densidad tradi.)	Panel Espacial (reducido)
<b>Ln Emisiones de CO<sub>2</sub> Ciudad</b>				
Factor Espacial $\lambda$		0.627 *** (0.027)	0.616 *** (0.019)	0.643 *** (0.018)
Ln Densidad Ciudad	-0.638 *** (0.168)	-0.268 *** (0.064)		-0.248 *** (0.045)
Ln Densidad Tradi.			-0.893 *** (0.105)	
Ln Índice de forma	-0.013 (0.135)	-0.152 (0.093)	-0.353 *** (0.070)	
Ln Población Ciudad	1.901 *** (0.139)	0.923 *** (0.074)	1.426 *** (0.091)	0.904 *** (0.050)
Ln PIB/cap. Ciudad	-2.274 *** (0.298)	-0.384 * (0.226)	-0.291 * (0.157)	0.014 (0.012)
Ln PIB/cap. Ciudad <sup>2</sup>	0.145 *** (0.018)	0.025 * (0.013)	0.018 * (0.009)	
Dummy Ciudad	YES	YES	YES	YES
Observaciones	1,270	1,270	1,270	1,270
Individuos	635	635	635	635

La columna 1 de la tabla 1 presenta los resultados de la estimación de un modelo de panel estático que incluye la densidad de la ciudad (ratio personas/superficie construida) y el índice de forma de la ciudad como principales características de las estructuras espaciales, pero no considera la dependencia espacial de las emisiones entre ciudades. Se introduce el PIB/cápita de la ciudad junto con sus términos al cuadrado para captar mejor la relación no-lineal entre el PIB/cápita y las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel de ciudad. La columna 2 es nuestro modelo de panel espacial de referencia: utiliza la misma especificación que en la columna 1 y agrega la difusión espacial de las emisiones entre ciudades como variable explicativa adicional. La columna 3 se basa en la misma especificación, pero usa la definición tradicional de densidad (ratio personas/superficie) como prueba de robustez. La columna 4 proporciona otra prueba de robustez empleando una forma reducida del modelo en la que se utiliza la densidad de la ciudad (personas/ superficie construida) como única característica de las estructuras espaciales.

En todas las especificaciones, el coeficiente asociado a densidad es negativo y altamente significativo, lo que indica que, en promedio, a mayor densidad menores emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel de ciudad, incluso tomando en cuenta la dependencia espacial de las emisiones entre ciudades vecinas. Curiosamente, el coeficiente asociado al índice de forma urbana es insignificante en nuestro modelo de referencia y sólo resulta significativo y negativo cuando se utiliza la definición tradicional de densidad (es decir, la columna 3). En esta regresión, el índice de forma urbana podría absorber parte de los efectos asociados a ciudades compactas, que no se contabilizan adecuadamente con la medida de densidad tradicional, como se ha comentado en la sección anterior. En cualquier caso, el índice de forma urbana tiene un impacto menos robusto que el indicador de densidad en términos estadísticos. Finalmente, el coeficiente lambda del factor de retraso espacial es positivo y significativo, lo que implica que el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> de una ciudad tiene un impacto positivo en el nivel de emisiones de las ciudades vecinas. Esto confirma que las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel de ciudad se ven afectadas por un proceso de difusión espacial, subrayando así que una ciudad no opera sola, sino que su rendimiento en materia de carbono también es el

resultado de las interacciones que tiene con el “sistema de ciudades” más amplio al que pertenece.

A partir del modelo de referencia de la columna 2, evaluamos cuantitativamente el impacto de cada variable explicativa sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>. Para ello, consideramos el proceso de interacción espacial capturado a través del coeficiente lambda y estimamos el efecto directo que un cambio en una variable explicativa puede producir en las emisiones de una ciudad determinada, así como el efecto indirecto que esta variación crea para las ciudades vecinas. El efecto total presentado en la tabla 2 corresponde a la media de los efectos directos y de retroalimentación producidos en todas las ciudades por un cambio en una variable explicativa. A excepción del índice de forma urbana, todos estos efectos son significativos al nivel de confianza del 1%.

**Tabla 2. Elasticidades directas, indirectas y totales de las emisiones de CO<sub>2</sub> de las ciudades**

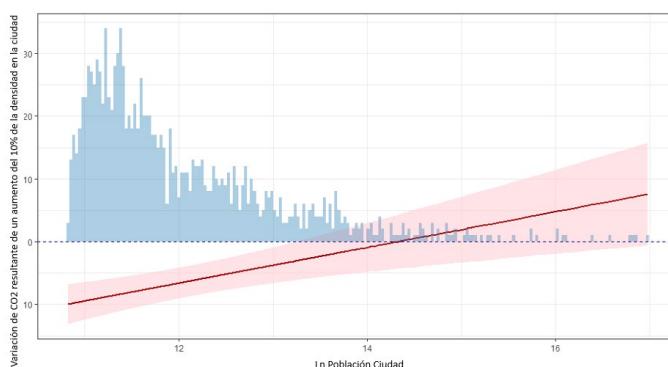
	Directo	Indirecto	Total
Ln Densidad	-0.30	-0.42	<b>-0.72</b>
Ln Forma	-0.17	-0.24	-0.41
Ln Población	1.02	1.46	<b>2.48</b>
Ln PIB/cap	-0.42	-0.61	<b>-1.03</b>
Ln PIB/cap <sup>2</sup>	0.03	0.04	<b>0.07</b>

Nota: los errores estándar simulados indican que todas las variables son significativas excepto Ln Forma.

Los resultados indican que, en promedio, cuando la población de una ciudad aumenta un 1%, sus emisiones de CO<sub>2</sub> se disparan un +2,48%. Sin embargo, el impacto neto de CO<sub>2</sub> asociado a este crecimiento poblacional depende de los patrones de expansión espacial que prevalecen a nivel de la ciudad. Cuando el crecimiento poblacional de la ciudad se traduce por un aumento de densidad de un 1%, las emisiones de CO<sub>2</sub> se reducen un 0,72%. Por otro lado, el impacto marginal del PIB/cápita de la ciudad sobre las emisiones sigue una curva en forma de U en la que un mayor PIB/cápita de la ciudad primero reduce el nivel de emisiones, aunque este efecto se invierte rápidamente y, para más del 90% de las ciudades de nuestra muestra, un mayor PIB/cápita implica mayores emisiones a nivel de la ciudad.

Resulta interesante usar estos resultados para evaluar el impacto climático del crecimiento urbano en Latinoamérica en la próxima década. Nuestros parámetros indican que un aumento del 10% de la población de una ciudad conducirá a un incremento de sus emisiones del 24%. Ahora bien, entre 2000 y 2015, para la muestra de 635 ciudades, un aumento del 10% de la población de la ciudad se acompaña en promedio de un incremento promedio de la densidad del 7.1%. Esto implica que, bajo los patrones de expansión espacial de las ciudades latinoamericanas, se produce un “ahorro de carbono” de aproximadamente el -5.1% ( $-0,72 \times 7.1$ ). El aumento del 10% de la población de la ciudad resultará por lo tanto en un incremento neto de las emisiones urbanas de aproximadamente +19% (24-5). En otras palabras, si no se altera el actual modelo de desarrollo urbano, las emisiones de las ciudades aumentarán dos veces más rápido que la población de esta misma ciudad.

**Figura 4.** Impacto marginal de un aumento del 10% de la densidad en las emisiones de CO2 de la ciudad, en función de la población total de la ciudad



Nota: el histograma azul representa la distribución de la población de las 635 ciudades de la muestra.

Por último, exploramos la heterogeneidad de los efectos asociados a una mayor densidad con el fin de identificar las ciudades donde el aumento de esta última tiene mayor impacto en las emisiones. Para ello, introducimos un término de interacción para capturar cómo varían las elasticidades de CO2 de la densidad según la población total de la ciudad y la figura 4 presenta la estimación de este coeficiente estimado con nuestro modelo de referencia (columna 2), así como la distribución de la población de las ciudades de nuestra muestra. Al interactuar el efecto asociado a densidad con la población de la ciudad, destaca que, para las ciudades pequeñas (i.e. población de aproximadamente 100.000 personas), un aumento del 10% de la densidad resulta en una reducción de aproximadamente el -8.1% en las emisiones de la ciudad. Sin embargo, a medida que aumenta la población de la ciudad, el “ahorro de carbono” obtenido gracias a una mayor densidad se reduce paulatinamente y es estadísticamente insignificante cuando la población de la ciudad se aproxima al millón de habitantes. Esto sugiere que, para las grandes ciudades, un aumento de la densidad podría exacerbar los efectos de la congestión ya existentes y tener efectos poco claros en términos de emisiones de CO2. Sin embargo, en el caso de las ciudades pequeñas e intermedias que constituyen el grueso de nuestra muestra (el 75% de las ciudades tienen un nivel de Ln población inferior a 12,52), y que se espera sean las que experimenten el mayor crecimiento urbano durante la próxima década, los beneficios de una mayor densidad siguen siendo claros y subrayan la necesidad de limitar la futura expansión del suelo urbano para contribuir a un desarrollo con bajas emisiones de carbono.

#### 4. CONSIDERACIONES FINALES

Esta comunicación proporciona evidencia de que, para 635 ciudades distribuidas en 7 países de América Latina, la densidad tiene un impacto significativo y negativo en las emisiones de CO2 de las ciudades. Estos hallazgos están alineados con estudios previos y confirman que las estructuras espaciales de las ciudades impactan significativamente las emisiones urbanas. Sin embargo, también encontramos que el impacto de la densidad es diferenciado según la población total de la ciudad: para ciudades pe-

queñas es sumamente relevante, pero deja de ser estadísticamente significativa para ciudades de más de 1 millones de habitantes. Las ciudades pequeñas e intermedias, donde se espera que el ritmo de crecimiento de la población urbana sea el más alto durante la próxima década, serán áreas claves para limitar el crecimiento de las emisiones en América Latina. De cara al futuro, el papel que puede desempeñar la planificación territorial para frenar las emisiones de CO<sub>2</sub> será primordial: si no se altera el actual modelo de desarrollo urbano, limitando la expansión espacial y aumentando la densidad de las ciudades, el incremento de emisiones urbanas será aproximadamente dos veces más rápido que el aumento poblacional.

## REFERENCIAS

- AHLFELDT, G.M. AND PIETROSTEFANI, E. (2017). The compact city in empirical research: A quantitative literature review. *SERC Discussion Papers 02015*, Spatial Economics Research Centre, LSE
- ANSELIN, L. (1988). *Spatial Econometrics: Methods and Models* (Volume 4), Springer Nature
- CHEN, G., LI, X., LIU, X. ET AL. (2020). Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways. *Nat Commun* 11, 537 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14386-x>
- DIJKSTRA, L. FLORCZYK, A. J. FREIRE, S. KEMPER, T. MELCHIORRI, M. PESARESI, M. SCHIAVINA, M. (2020). Applying the Degree of Urbanisation to the globe: A new harmonised definition reveals a different picture of global urbanisation. *Journal of Urban Economics*, 103312, <https://doi.org/10.1016/j.jue.2020.103312>
- FLORCZYK A.J., CORBANE C., EHRLICH D., FREIRE S., KEMPER T., MAFFENINI L., MELCHIORRI M., PESARESI M., POLITIS P., SCHIAVINA M., SABO F., ZANCHETTA L. (2019). GHSL Data Package 2019. EUR 29788 EN, Luxembourg
- GAO J., O'NEILL B., 2020. MAPPING GLOBAL URBAN LAND FOR THE 21ST CENTURY WITH DATA-DRIVEN SIMULATIONS AND SHARED SOCIOECONOMIC PATHWAYS. *NATURE COMMUNICATIONS* 11:2302,
- GÜNERALP B., ET AL. (2020). Trends in urban land expansion, density, and land transitions from 1970 to 2010: a global synthesis. *Environ. Res. Lett.* 15 044015, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6669>
- IPCC. 2018. SUMMARY FOR POLICYMAKERS. IN: *GLOBAL WARMING OF 1.5°C*. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, GENEVA, SWITZERLAND, 32 PP.
- JEDWAB, R., PRAKASH L., AND ANTHONY Y. (2021). Comparing cities in developed and developing countries: Population, land area, building height and crowding. *Regional Science and Urban Economics*, vol. 86(C).
- KUMMU, M., TAKA, M. & GUILLAUME, J. (2018). Gridded global datasets for Gross Domestic Product and Human Development Index over 1990–2015. *Sci Data* 5, 180004. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.4>
- LEE, S. LEE, B. (2014). The influence of urban form on GHG emissions in the U.S. household sector. *Energy Policy*, 68 (2).
- MCDONALD, R. I. ET AL. (2011). Urban growth, climate change, and freshwater availability. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 108, 6312–6317.
- MIA, P., HAZELTON, J., GUTHRIE, J. (2019). Greenhouse gas emissions disclosure by cities: the expectation gap. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, 2040–8021.

- MUNIZ, I. GALINDO, A. (2005). Urban form and the ecological footprint of commuting. The case of Barcelona. *Ecological Economics* 55, 499–514.
- ODA, T. MAKSYUTOV, S. AND ANDRES, R. J. (2018). The Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO2, version 2016 (ODIAC2016): a global monthly fossil fuel CO2gridded emissions data product for tracer transport simulations and surface flux inversions. *Earth Syst. Sci. Data*
- OU, J. LIU, X. WANG, S. XIE, R. LI, X. (2019). Investigating the differentiated impacts of socioeconomic factors and urban forms on CO2 emissions: Empirical evidence from Chinese cities of different developmental levels. *Journal of Cleaner Production*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.123>.
- SETO K. C., GÜNERALP B., HUTYRA L.R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools, *Proceedings of the National Academy of Sciences* Oct 2012, 109 (40) 16083–16088; DOI: 10.1073/pnas.1211658109
- UN STATISTICAL COMMISSION (2020). 51st Session. A recommendation on the method to delineate cities, urban and rural areas for international statistical comparisons. Retrieved from: <https://unstats.un.org/unsd/statcom/51st-session/documents/>
- UNDESA. (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Online Edition. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- UN-HABITAT. (2016). Urbanization and Development Emerging Futures, World Cities Report. United Nations Human Settlements Programme
- YORK, R. ROSA, EA. DIETZ, T. (2003). STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 46, 351–65.
- ZHOU, C. WANG, S.(2018). Examining the determinants and the spatial nexus of city-level CO2 emissions in China: A dynamic spatial panel analysis of China's cities. *Journal of Cleaner Production*, Volume171.