



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Boletín Ambiental

Fotografía: Iain D. Stewart

Instituto de Estudios Ambientales -IDEA- Sede Manizales

182 | agosto de
2021

Mapas climáticos urbanos para la
planificación ambiental en
Manizales, Colombia

IDEA | **30**
Años
1991-2021
Instituto de Estudios Ambientales
Sede Manizales

Mapas climáticos urbanos para la planificación ambiental en Manizales, Colombia

MSc. Dalia Nuith Roncancio Rubio
Investigadora estudios climáticos urbanos y de medio ambiente
Instituto de Estudios Ambientales Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
Email: dnroncancior@unal.edu.co

Ph.D. Iain D. Stewart
Investigador estudios climáticos urbanos y sustentabilidad urbana
Global Cities Institute, University of Toronto, Canada
Email: iain.stewart@utoronto.ca

Para descargar el boletín:

 [Http://idea.manizales.unal.edu.co/boletin-ambiental.html](http://idea.manizales.unal.edu.co/boletin-ambiental.html)

1. Introducción

El estudio de la climatología urbana está separado del planeamiento urbano en la mayoría de las regiones del mundo. Esto se atribuye, generalmente, a la mala comunicación entre los científicos del clima y los urbanistas (Oke, 1988; Ng, 2012). Sin embargo, ayudar a unir estas dos profesiones es el objetivo de los “mapas climáticos urbanos” o UCMapas. Estos fueron desarrollados a mediados del siglo XX en ciudades industrializadas de Alemania (Scherer et al., 1999; Ng & Ren, 2015), y su propósito es transmitir información gráfica simple sobre el clima local a los planificadores urbanos y tomadores de decisiones.

Se reconocen dos tipos de UCMapas: (1) “mapas de análisis”, que combinan información climática y de cobertura terrestre/uso de la tierra para mostrar patrones espaciales relevantes; y (2) “mapas de recomendación”, que dan instrucciones para preservar (o modificar) estos patrones donde son favorables (o desfavorables) para el entorno urbano. Muchas docenas de ciudades en todo el mundo han procesado sus propios UCMapas para integrarlos en planes maestros urbanos (Ren et al., 2011); sin embargo, existen muy pocos de estos para las ciudades de América del Sur.

En este artículo utilizamos UCMapas para comunicar información climática urbana a los planificadores ambientales en Manizales. Este es el primer proyecto de mapeo de este tipo para una ciudad colombiana. Nuestros objetivos son triples: (1) cartografiar y analizar el clima urbano de Manizales y su relación con la topografía y la forma edificada; (2) identificar los resultados negativos de esta relación para la población local; y (3) ofrecer recomendaciones de planificación para mitigar y monitorear estos resultados negativos. En las siguientes secciones ofrecemos una breve introducción a nuestro trabajo sobre este tema. Actualmente, se está revisando una versión completa de este artículo en *Cybergeog: European Journal of Geography*.

2. Área de Estudio

Manizales es una ciudad ecuatorial ubicada a gran altura (2126 m sobre el nivel del mar) en la vertiente occidental de la cordillera Central Andina en Colombia (Figs. 1 y 2). El crecimiento hacia el exterior de la ciudad está limitado por su geografía física, principalmente, las pendientes empinadas e inestables que rodean el área urbana. La “verticalización” (es decir, edificios altos) es por lo tanto una estrategia de crecimiento que permite la expansión hacia arriba (en lugar de hacia afuera) (Fig. 2b). Gran parte del área urbana consiste en un edificio compacto de baja y media altura, con estructuras más altas ubicadas en el núcleo central y esparcidas por toda la ciudad (Fig. 3). El terreno rural de Manizales es un mosaico de laderas boscosas y despejadas, que se utiliza, principalmente, para la producción agrícola (por ejemplo, plátanos, café, pastizales). Muy poco del área natural que rodea a Manizales está protegida del desarrollo urbano o industrial, a pesar de su importancia cultural y ecológica para la región (Fig. 2c).

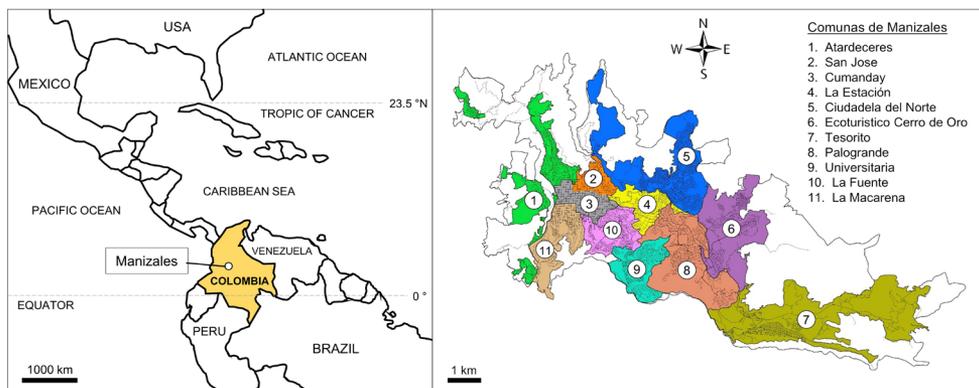


Figura 1. Izquierda: ubicación de Manizales en las Américas. Derecha: las once comunas de Manizales.



Figura 2. (a) Mirando hacia el este a través de la cordillera Central de Manizales; (b) nuevas torres y barrios invaden el paisaje natural de Manizales; (c) áreas ecológicamente protegidas al noreste de Manizales; (d) un penacho industrial “en bucle” cerca del centro de la ciudad; (e) estación de observación climática en la comunidad de Bosques del Norte (ver Tabla 1); (f) un estrecho “cañón de la calle” que desciende por las laderas de la cresta central. Crédito de la foto: I.D. Stewart y Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CDIAC).

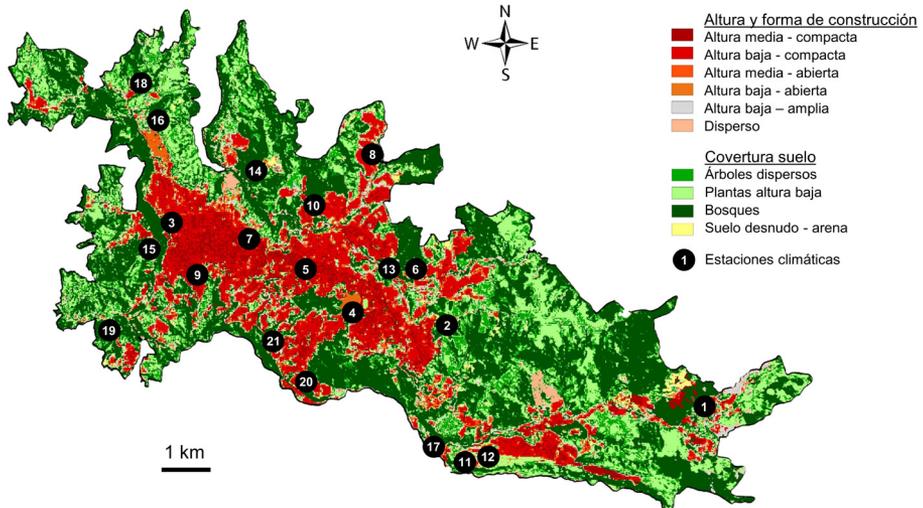


Figura 3. Altura - forma de construcción y cobertura del suelo en Manizales y sus alrededores. Las categorías se corresponden con la clasificación de la Zona Climática Local (LCZ) de Stewart y Oke (2012). El mapa fue creado con los métodos de Bechtel et al. (2015) que involucran imágenes Landsat 8 y software QGIS. También se muestran los sitios de las estaciones de observación climática. Consulte la Tabla 1 para conocer los metadatos de la estación.

3. Métodos y fuentes de datos

Usamos el software QGIS para crear un conjunto temático de mapas climáticos urbanos para Manizales. Los datos sociales y ambientales para construir los mapas se obtuvieron de varias fuentes, incluido Google Earth Engine, el Servicio Meteorológico Nacional de EE. UU., la literatura publicada y las redes hidrometeorológicas locales.

3.1 Redes hidrometeorológicas locales

En este estudio se utilizaron 21 estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas de la red Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas (SIMAC) con base en su ubicación en Manizales y su representatividad de los sitios de medición (Fig.2e y 3; Tabla 1). La “representatividad” se juzgó según los criterios de ubicación internacional dados en Oke (2006) y Stewart y Oke (2012). A estos datos se suman los registros de viento sinópticos del aeropuerto La Nubia, que se obtuvieron del sitio web de Iowa Environmental Mesonet (<https://mesonet.agron.iastate.edu>).

Los mapas de temperatura del aire y precipitación se trazaron con el software QGIS, utilizando un modelo de interpolación (IDW). Seleccionamos el año 2017 para la elaboración de mapas y el análisis climático porque contiene el registro más completo de datos de observación de los últimos años. Los datos de julio y noviembre se eligieron para representar las temporadas de lluvia baja y alta, respectivamente, en base a la integridad de sus registros. Climatológicamente, 2017 está asociado con un episodio de ENOS neutro de enero a agosto y un episodio de La Niña de septiembre a diciembre.

Tabla 1. Metadatos para estaciones de observación climática en Manizales. Las estaciones están ordenadas por rango por elevación.

No. ^a	Nombre de estación	Elevación (m)	Ubicación instrumento ^b	Descripción del entorno local ^c
1	Skinco	2,350	Nivel del suelo	Urbana (abierta) & rural (plantas bajas)
2	Niza	2,256	Nivel del suelo	Rural (árboles dispersos, pocos edificios)
3	Ingeominas	2,226	Azotea de edificio	Urbana (compacta) & rural (bosque)
4	Posgrados	2,195	Azotea de edificio	Urbana (abierta)
5	Hospital	2,183	Azotea de edificio	Urbana (abierta & compacta)
6	Yarumos	2,179	Azotea de edificio	Urbana (abierta) & rural (bosque)
7	Liceo	2,156	Azotea de edificio	Urbana (abierta & compacta)
8	Bosques ^d	2,126	Azotea de edificio	Urbana (compacta)
9	Carmen	2,112	Azotea de edificio	Urbana (compacta)
10	Peralonso	2,094	Nivel del suelo	Urbana (compacta) & rural (bosques)
11	La Nubia–Campus	2,092	Azotea de edificio	Urbana (abierta) & rural (árboles dispersos)
12	Aeropuerto	2,080	Nivel del suelo	Urbana (abierta) & rural (plantas bajas)
13	Aguas de Manizales	2,064	Nivel del suelo	Urbana (abierta) & rural (bosques)
14	Emas	2,060	Nivel del suelo	Rural (árboles dispersos)
15	Alcázares	2,057	Azotea de edificio	Urbana (compacta) & rural (bosques)
16	Mirador Vpilar	2,046	Nivel del suelo	Urbana (abierta) & rural (bosques)
17	Bosque Popular	1,970	Nivel del suelo	Urbana (abierta) & rural (bosques)
18	La Palma	1,965	Azotea de edificio	Rural (árboles dispersos, pocos edificios)
19	Chec	1,940	Nivel del suelo	Urbana (abierta) & rural (plantas bajas)
20	Aranjuez	1,915	Azotea de edificio	Urbana (compacta)
21	Terminal de buses	1,890	Nivel del suelo	Urbana (abierta) & rural (bosques)

^a Consulte la Fig.3 para conocer las ubicaciones de las estaciones.

^b En el caso de las estaciones a nivel del suelo, los instrumentos se colocan entre 2 y 3 m por encima de la superficie del suelo; la excepción es la estación del aeropuerto (n° 12), cuyo anemómetro se encuentra a 10 m sobre la superficie.

^c Forma urbana y cobertura de suelo rural que rodea la estación a una distancia de 250 m. Consulte Stewart y Oke (2012) para obtener una explicación.

^d Ver la figura 2e

3.2 Literatura publicada

Para complementar las mediciones de viento locales obtenidas de las estaciones climáticas de Manizales, obtuvimos datos adicionales sobre el flujo de aire a mesoescala de simulaciones numéricas en González et al. (2018). Para la contaminación del aire local, obtuvimos datos

empíricos de Cuesta et al. (2018) para concentraciones gaseosas de NO_x y SO₂ en el aire. Por último, los datos demográficos y socioeconómicos de las comunas se obtuvieron de Arteaga (2015).

3.3 Google Earth Engine

Las temperaturas de la superficie terrestre (LST) para Manizales se recuperaron de productos de datos dentro de Google Earth Engine (GEE). Adquirimos imágenes satelitales (Landsat 8) para Manizales y convertimos los valores de radiancia de la parte superior de la atmósfera a temperaturas de la superficie terrestre utilizando el algoritmo de Monoventana Estadística en GEE (Ermida et al., 2020). Todas las imágenes se procesaron con el software QGIS.

3.4 Servicio Meteorológico Nacional de EE. UU.

Para evaluar el potencial de estrés térmico humano en Manizales, calculamos los valores del Índice de Calor (HI) para las condiciones de la tarde de julio de 2017. El HI mide la temperatura percibida (no real) que sienten los humanos, teniendo en cuenta los efectos de la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar (Steadman, 1979). Los valores HI se utilizan para informar las pautas de salud pública durante condiciones climáticas que pueden causar estrés térmico (Tabla 2). Calculamos los valores de HI para Manizales con una calculadora de HI en línea proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional de EE. UU. (<https://www.weather.gov/safety/heat-index>). Los datos de entrada se obtuvieron de las redes hidrometeorológicas locales.

4. Resultados

4.1 UCMapas

4.1.1 Temperatura del aire (T_{air}) e Índice de calor (HI)

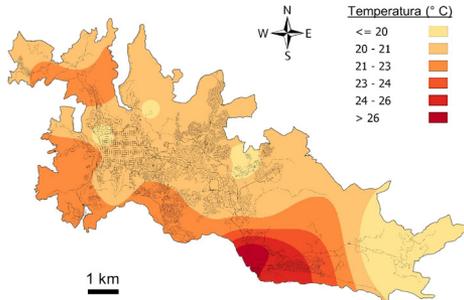
Durante el mes de julio de 2017, la T_{air} diaria media a las 1500 h (es decir, la hora aproximada de los máximos diurnos en Manizales [Zambrano et al., 2020]) fue <21 °C para gran parte del área urbanizada de la ciudad. En el sur de la ciudad, donde la elevación desciende, T_{air} a las 1500 h se eleva a 24-28 °C (Fig. 4a). Esta distribución térmica no produce valores HI peligrosos en ninguna región de la ciudad (Fig. 4b; Tabla 2). Sin embargo, si esos mismos valores de HI se ajustan a pleno sol, gran parte del área municipal supera los 27 °C, mientras que, en las elevaciones más bajas, los valores de HI superan los 31 °C, lo que eleva el nivel de alerta a “extrema precaución” con la exposición prolongada a la luz del sol (Fig. 4c; Tabla 2).

Para el caso nocturno del 25 de julio de 2017, T_{air} a las 2200 h es <20 °C para toda el área urbana, excepto para las elevaciones más bajas hacia el sur (Fig. 4d). En el centro de la ciudad, T_{air} desciende a 18-19 °C, con aire más frío que invade el área urbana en los puntos de entrada al noreste, donde los vientos de ladera abajo se encuentran con el límite urbano-rural y deprimen T_{air} a <16 °C. En comparación con la mayoría de las ciudades donde los efectos de la isla de calor urbano (UHI) son evidentes en los mapas de temperatura local (de manera que la ciudad es más cálida que el campo, particularmente de noche, por ejemplo, Jáuregui, 1986), Manizales es una excepción.

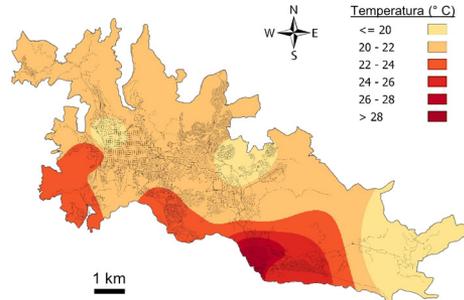
Esto no sugiere que los efectos urbanos en T_{air} estén ausentes, sino que los efectos de elevación son más dominantes. Estos últimos fueron eliminados con esquemas de corrección de temperatura en un trabajo anterior de Roncancio (2013), que reveló una diferencia T_{air} urbano-

rural promedio de 1.5 °C para vecindarios compactos. Se debe tener en cuenta este resultado al interpretar mapas isotérmicos de Manizales para los efectos urbanos sobre el clima.

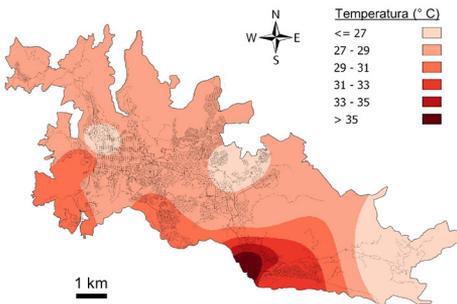
(a) T_{air} media, 1500 hr, Julio 2017



(b) HI (sombra), 1500 hr, Julio 2017



(c) HI (luz solar), 1500 hr, Julio 2017



(d) T_{air} , 2200 hr, 25 Julio 2017

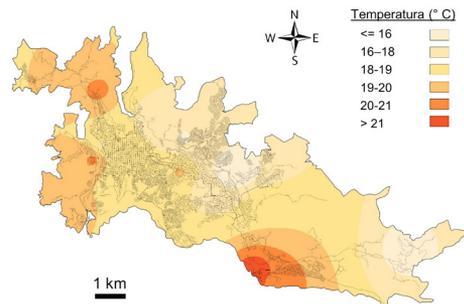


Figura 4. Campos de temperatura del aire (T_{air}) e Índice de calor (HI) para Manizales: (a) T_{air} promedio a las 1500 h para julio de 2017; (b) valores medios de HI (a la sombra) a las 1500 h para julio de 2017; (c) valores medios de HI (bajo el sol) a las 1500 h para julio de 2017; y (d) T_{air} a las 2200 h para el 25 de julio de 2017. Consulte la Tabla 2 para obtener un resumen de los efectos sobre la salud asociados con los valores de HI.

Tabla 2. Valores del índice de calor (HI) y sus efectos sobre la salud relacionados.
Fuente: Servicio Meteorológico Nacional de EE. UU.

HI (°C)	Nivel de alerta y trastornos por calor asociados con la exposición prolongada o actividad extenuante
27–32	Precaución: la fatiga es posible con exposición y actividad prolongadas. La actividad continua podría resultar en calambres por calor.
32–41	Extrema precaución: los calambres por calor y el agotamiento por calor son posibles. La actividad continua podría resultar en un golpe de calor.
41–54	Peligro: es probable que se produzcan calambres por calor y agotamiento por calor; La insolación es probable con actividad continua.
> 54	Peligro extremo: el golpe de calor es inminente.

4.1.2 Temperatura de la superficie terrestre (LST)

Los valores LST derivados de satélites representan vistas bidimensionales de la superficie (es decir, perspectiva a “ojo de pájaro”). En áreas urbanas, los valores LST están, por lo tanto, sesgados hacia los tejados, las copas de los árboles y las superficies de las calles. Las distribuciones diurnas de LST para diciembre en Manizales son características de un patrón de clima claro y seco (Fig. 5). Los tejados de los edificios y las superficies pavimentadas en áreas urbanas compactas son más cálidas (> 35 °C), especialmente, en elevaciones bajas, en comparación con el T_{air} regional (21 °C).

Por el contrario, las pendientes escarpadas y densamente arboladas son las superficies más frías de la región (<20 °C). Los “puntos calientes” notables de LST incluyen el centro histórico de la ciudad, vecindarios residenciales densamente poblados e instalaciones industriales. A diferencia de la UHI atmosférica, la UHI “superficial” de Manizales coincide con su huella urbana. Por lo tanto, es fácilmente discernible en el mapa LST de la ciudad (Fig. 5). La diferencia máxima de LST urbano-rural en Manizales para el 18 de diciembre de 2017 es de 25 °C.

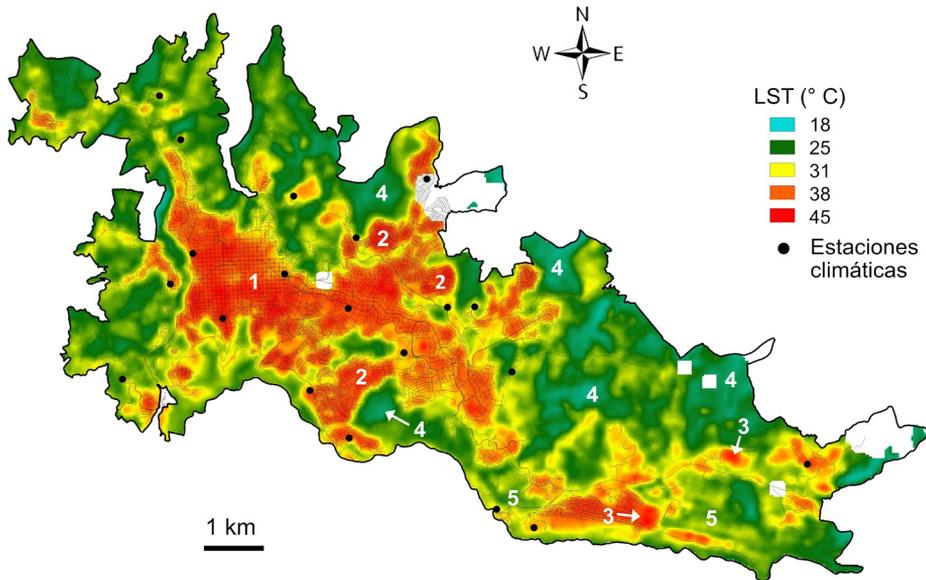


Figura 5. Temperatura de la superficie terrestre (LST) de Manizales a las 1018 h para el 18 de diciembre de 2017. La imagen es de Landsat 8; la resolución espacial es de 100 m. Las condiciones climáticas en el momento de la adquisición de la imagen son claras, cálidas y secas, con una ligera brisa del noroeste ($2-3 \text{ m s}^{-1}$). Símbolos del mapa: 1 = núcleo comercial densamente construido; 2 = barrios residenciales compactos; 3 = grandes instalaciones industriales; 4 = pendientes de gran pendiente con árboles densos; 5 = pendientes de baja pendiente con árboles dispersos. Las áreas blancas dentro de los límites de la ciudad se corresponden con la cobertura de nubes.

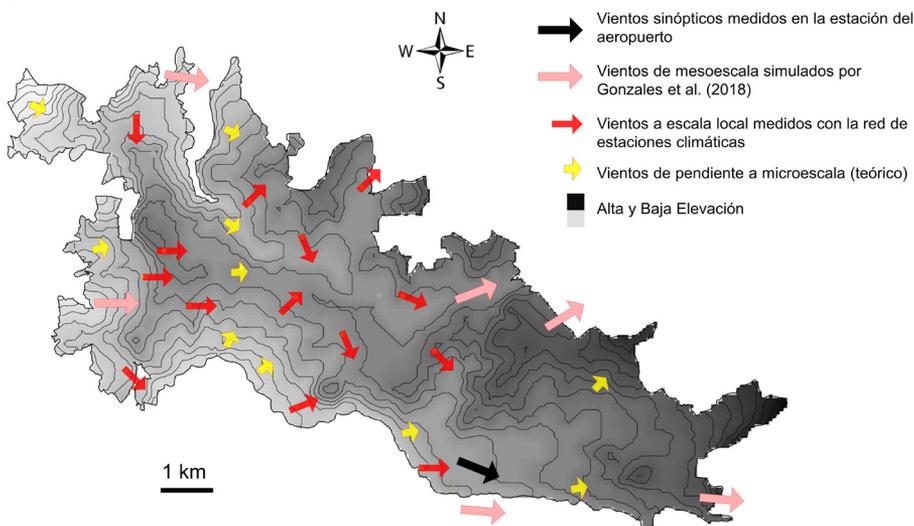
4.1.3 Vientos

A escala local, los vientos en Manizales están influenciados por flujos a nivel sinóptico, como se observa en la estación del Aeropuerto. El flujo direccional en estas dos escalas es consistente, es decir, oeste durante el día y este durante la noche, y está bien descrito por las mediciones de la red de observación del clima (Fig.6). Las circulaciones de aire diurnas se mueven cuesta arriba (anabáticos) hacia el área urbana, principalmente desde el oeste, pero con aspectos hacia el sur y el norte (Fig. 6a).

En el centro de la ciudad, el flujo de aire se canaliza a través de la red de calles este/oeste y norte/sur.

Por la noche, el aire se mueve cuesta abajo (catabáticos) desde un terreno más alto hacia el este y el norte, a través de los anchos “cañones de la calle” y hacia el oeste a través de la cresta (Fig. 6b). Las “calles de viento” se forman en vecindarios donde el aire drena ladera abajo a través de los cañones durante la noche y se mueve cuesta arriba durante el día (Fig. 2f). Aunque la profundidad de este flujo no es grande y su movimiento es lento e intermitente (del orden de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), las implicaciones para la dispersión de la contaminación en los barrios urbanos son notables (Geiger, 1965).

(a) Área de viento diurno



(b) Área de viento nocturno

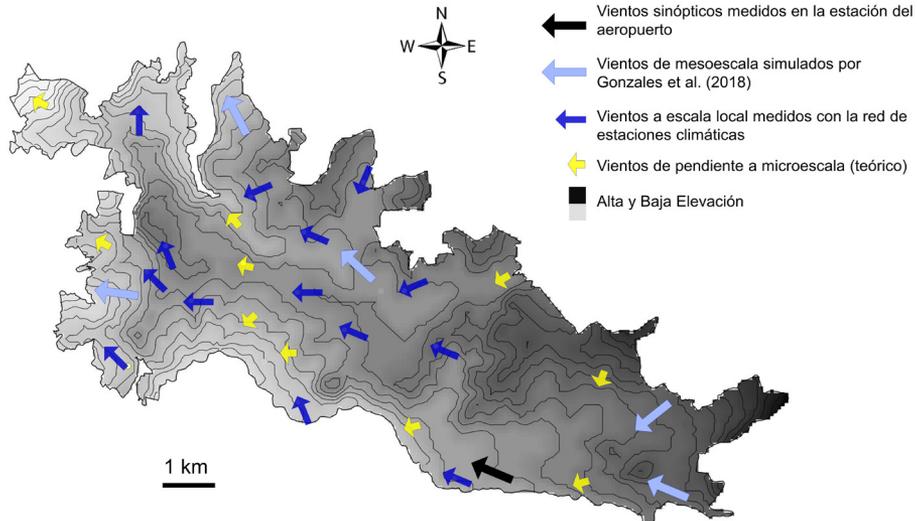


Figura 6. Campo de viento para Manizales (2017), que representa (a) horas diurnas (0900–1800 h) y (b) horas nocturnas (1900–0700 h). La posición de las flechas de viento se determina mediante mediciones en estaciones climáticas y mediante simulaciones numéricas de modelos climáticos (González et al., 2018). Los vientos a microescala son teóricos y se basan en las leyes del flujo de pendientes (por ejemplo, Geiger, 1965). Tenga en cuenta que las flechas indican la dirección del viento, no la velocidad. El intervalo de contorno para la elevación es de 50 m.

4.1.4 Precipitación

La precipitación mensual de noviembre de 2017 muestra un patrón característico determinado por el levantamiento orográfico de masas de aire que se mueven cuesta arriba hacia la ciudad (Fig.7). Las elevaciones más bajas al sur, oeste y este reciben menos lluvia, mientras que las elevaciones más altas a lo largo de la cordillera Central reciben más. Las precipitaciones disminuyen drásticamente al aumentar las elevaciones hacia el este, lo que sugiere un efecto de “sombra de lluvia” a sotavento de la ciudad.

La posición de máxima precipitación a favor del viento (cuesta arriba) del centro de la ciudad aumenta la posibilidad de una convección mejorada debido a los efectos térmicos, químicos y mecánicos de la ciudad áspera y caldeada. Para estos efectos, se ha planteado la hipótesis durante muchas décadas de que la cantidad de lluvia aumenta por encima y a favor del viento de las grandes áreas urbanas (por ejemplo, Chagnon et al., 1971). Sin embargo, en la ciudad montañosa de Manizales, la hipótesis es intratable debido a que es difícil separar las cantidades de lluvia urbana y orográficamente inducida en el registro de precipitación (Lowry, 1998).

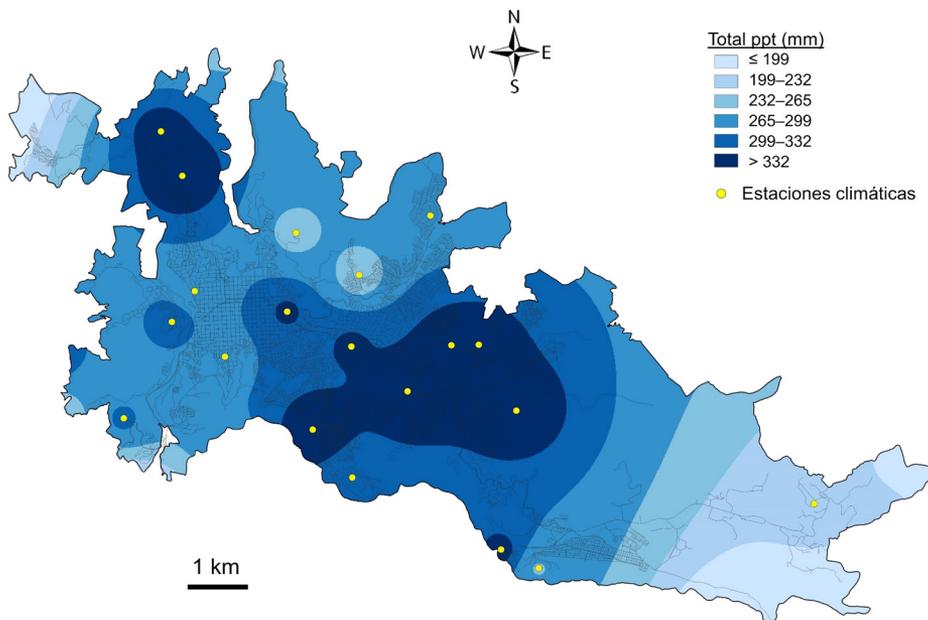


Figura 7. Precipitación mensual total (2017) para noviembre (temporada de altas precipitaciones). Debido a la variabilidad de las cantidades de lluvia en distancias cortas, se incluyeron siete estaciones climáticas adicionales más allá del área mapeada en la interpolación espacial de isoyetas.

4.1.5 Mapa de análisis climático

Durante el día el flujo de aire es hacia el este y pasa sobre extensas áreas verdes (no urbanas) hacia el oeste de la ciudad, ventilando así los vecindarios adyacentes (urbanos) en posición de sotavento (Fig.8). En los vecindarios ubicados a favor del viento de altas concentraciones de NOx, que provienen de áreas comerciales y residenciales densamente pobladas y muy transitadas, las poblaciones humanas están expuestas al aire degradado en la capa más baja de la atmósfera urbana.

El riesgo de exposición se ve parcialmente disminuido por las condiciones atmosféricas inestables que prevalecen en la ciudad durante las horas del día (Oke et al., 2017). Esto ha sido informado para Manizales por González et al. (2015) y Cuesta et al. (2020). En general, la inestabilidad en la atmósfera superficial mejora la mezcla vertical y la dispersión de los contaminantes del aire lejos de sus fuentes a nivel del suelo; en algunos casos, sin embargo, los contaminantes transportados por el aire recirculan hasta el nivel de los peatones cuando son transportados por columnas “en bucle” de las chimeneas industriales (Fig. 2d).

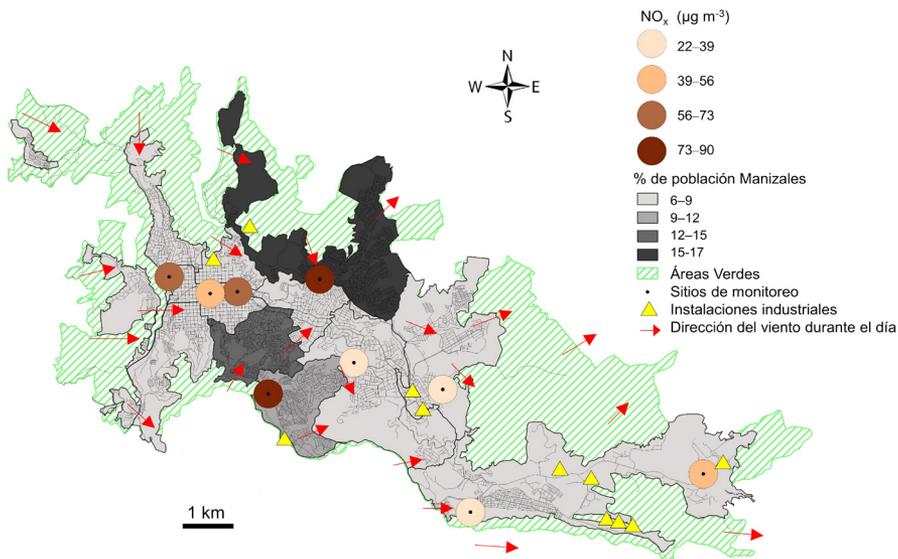


Figura 8. Concentración de NOx (noviembre de 2015), distribución de la población, cobertura del suelo y campo de viento diurno típico de Manizales. Los datos de NOx se obtienen de Cuesta et al. (2018).

5. Discusión

5.1 Mapas de recomendaciones de planificación

Debido al clima frío de Manizales, las recomendaciones de planificación para abordar el estrés por calor no son convincentes, aunque esto cambiará con el calentamiento global y la intensificación de los efectos del UHI. Mientras tanto, nuestra atención se dirige al potencial eólico de la ciudad para dispersar los contaminantes del aire de los barrios y las calles. En este texto ofrecemos dos recomendaciones de planificación de las tres descritas en el artículo en revisión: (1) mejorar la ventilación natural de Manizales mediante la preservación de las cuencas de aire locales; y (2) ampliar el monitoreo instrumentado de la atmósfera urbana.

5.1.1 Mejorar la ventilación natural

Nuestros mapas del campo de viento regional en Manizales muestran cuencas aéreas locales (o áreas de origen) de aire limpio que se origina en las laderas de los valles (durante el día) y las montañas (durante la noche) (Figuras 6 y 8). Mantener o mejorar el flujo de aire limpio desde estas cuencas de aire hacia la ciudad ayuda a dispersar y eliminar los contaminantes lejos de los vecindarios densamente poblados, mientras ventila los cañones de las calles donde el tráfico es pesado.

Esto requiere la preservación de las cuencas de aire naturales que coinciden con pendientes expuestas (por ejemplo, cimas de montañas, lados de valles, cursos de ríos) que generan vientos anabáticos y catabáticos (Fig.2b, c; Fig.9). Se debe preservar la cobertura natural de estas cuencas, con pocas o ninguna estructura construida o superficies pavimentadas. Además, se debe desalentar la construcción de edificios compactos de gran o mediana altura en o cerca del área de transición entre la ciudad y sus cuencas de aire naturales. La verticalización de esta área crea una barrera física conocida como “efecto muro”, que impide el flujo de aire hacia la ciudad (Ng, 2012).

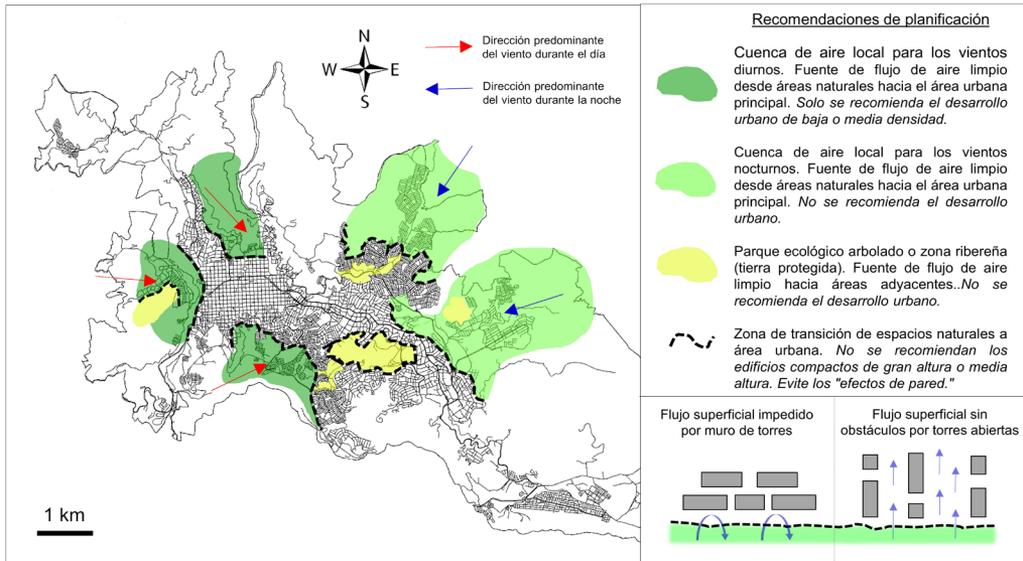


Figura 9. Recomendaciones para mejorar la ventilación natural en Manizales. Se sugiere la protección de las cuencas de aire diurnas y nocturnas, así como el espacio abierto de las torres.

5.1.2 Ampliar la monitorización instrumentada

Nuestra recomendación de expandir el monitoreo instrumentado de la atmósfera urbana tiene tres propósitos: (1) densificar la red existente donde existen brechas espaciales; (2) asegurar la colocación de sensores a una altura estándar para monitorear la exposición humana al calor y la contaminación; y (3) promover directrices internacionales para medir las variables atmosféricas en la ciudad (por ejemplo, Ott, 1977; Oke, 2006; WMO, 2008; Stewart y Mills, 2021) (Fig.10).

Si bien estos objetivos pueden no ser completamente alcanzables en Manizales, brindan principios rectores para una disposición "ideal" de

sensores para mejorar los informes en tiempo real y el análisis histórico de los datos atmosféricos. El arreglo deberá adaptarse a las limitaciones locales (por ejemplo, costo del instrumento, seguridad y acceso) y a recomendaciones anteriores en la literatura existente (por ejemplo, Mejía et al., 2006; Cortés, 2010).

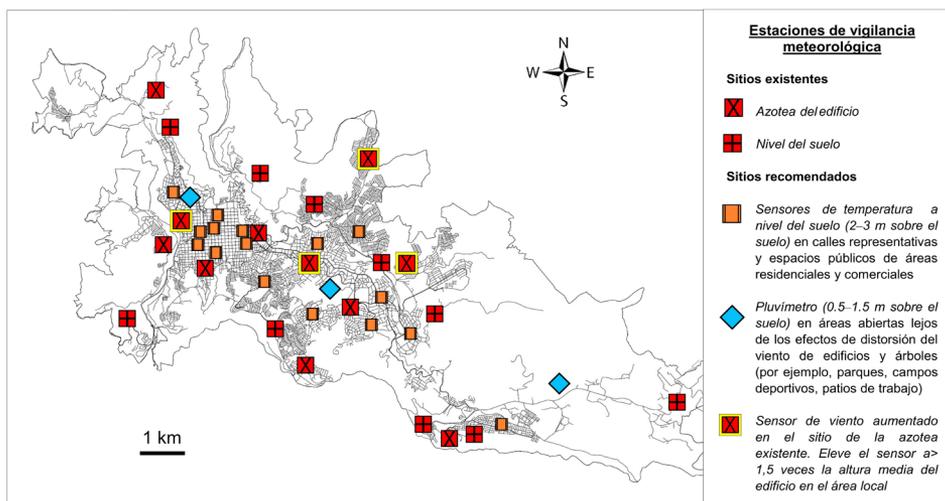


Figura 10. Recomendaciones para ampliar el monitoreo instrumentado del ambiente urbano en Manizales. Se sugiere la instalación de sensores de temperatura a nivel de la calle en áreas comerciales y residenciales, así como la colocación de pluviómetros a nivel del suelo en sitios urbanos y rurales abiertos. Se identifica una selección de estaciones existentes en la azotea para modificar la altura de los sensores de viento. Estos deben elevarse por encima de la turbulencia a microescala de edificios y árboles. Consulte la Fig. 3 y la Tabla 1 para ver los metadatos de la estación.

6. Conclusiones

Para concluir este trabajo, destacamos tres puntos críticos. Primero, se deben preservar las áreas verdes dentro y alrededor de Manizales. Estas áreas son esenciales para el suministro a largo plazo de aire limpio para la ciudad. En segundo lugar, el monitoreo del aire en Manizales debe expandirse a lugares donde los datos son escasos y donde especifican las directrices internacionales. La expansión debe involucrar a científicos ciudadanos para permitir la instalación de instrumentos en la propiedad privada, así como la reactivación de programas de educación ciudadana comunal, como “Bioc Ciudadanos”. En tercer lugar, y lo más importante, el conocimiento obtenido de los mapas de UCMaps de Manizales debe integrarse en la planificación ambiental local a través del Plan de Ordenamiento Territorial. Esto aumentará la conciencia profesional de los efectos urbanos en el clima local y fomentará soluciones colaborativas a los problemas climáticos a escala de vecindario.

7. Agradecimientos

Deseamos extender nuestro más sincero agradecimiento a los siguientes miembros del Instituto de Estudios Ambientales (IDEA): Fernando Mejía por sus valiosos comentarios sobre el manuscrito; Andrea Cuesta, Alexander Pachón y Beatriz Aristizábal (D.E.P.) por compartir datos ambientales para Manizales; a Freddy Leonardo Franco, Jeannette Zambrano y Jorge Julián Vélez por apoyar e impulsar este trabajo.

Referencias

Arteaga Botero G.B., 2015, “Análisis de indicadores de densidad en el municipio de Manizales, Colombia,” *Revista Ciudades, Estados y Política*, Vol. 2, No. 1, 44–53.

Bechtel B., Alexander P.J., Böhner J., Ching J., Conrad O., Feddema J., Mills G., See L., Stewart I.D., 2015, “Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities,” *ISPRS International Journal of Geo-Information*. Vol. 4, 199–219.

Chagnon S.A., Huff F.A., Semonin R.G., 1971, “METROMEX: An investigation of inadvertent weather modification,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 52, No. 10, 958–967.

Cortés A.C., 2010, Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en una ciudad de media montaña Andina. Caso de estudio: Manizales, MSc tesis, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

Cuesta-Mosquera A.P., González-Duque C.M., Velasco-García M., Aristizábal B.H., 2018, “Distribución espacial de concentraciones de SO₂, NO_x y O₃ en el aire ambiente de Manizales,” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Vol. 34, No. 3, 489–504.

Cuesta-Mosquera A.P., Wahl M., Acosta-López J.B., García-Reynoso J.A., Aristizábal-Zuluaga B.H., 2020, “Mixing layer height and slope wind oscillation: Factors that control ambient air SO₂ in a tropical mountain city,” *Sustainable Cities and Society*, Vol. 52, 101852.

Ermida S.L., Soares P., Mantas V., Göttsche F.-M., Trigo I.F., 2020, “Google Earth Engine open-source code for Land Surface Temperature estimation from the Landsat series,” *Remote Sensing*, Vol. 12, No. 9, 1471.

Geiger R., 1965, *The Climate Near the Ground*, 5th edn., Cambridge, Harvard University Press.

González-Duque C.M., Cortés-Araujo J., Aristizábal-Zuluaga B.H., 2015, "Influence of meteorology and source variation on airborne PM10 levels in a high relief tropical Andean city," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, No. 74, March, 200–212.

González C.M., Ynoue R.Y., Vara-Vela A., Rojas N.Y., Aristizábal B.H., 2018, "High-resolution air quality modeling in a medium-sized city in the tropical Andes: Assessment of local and global emissions in understanding ozone and PM10 dynamics," *Atmospheric Pollution Research*, Vol. 9, No. 5, 934–948.

Jáuregui E., 1986, "Tropical urban climates: Review and assessment." In: *Urban Climatology and its Applications with Special Regard to Tropical Areas*, WMO No. 652, Geneva, World Meteorological Organization.

Lowry W.P., 1998, "Urban effects on precipitation amount," *Progress in Physical Geography*, Vol. 22, No. 4, 477–520.

Mejía Fernández M., Londoño Linares J.P., Pachón Gómez J.A., 2006, "Red de estaciones meteorológicas para prevención de desastres en Manizales—Caldas (Colombia)," *Taller Internacional Sobre Gestión del Riesgo a Nivel Local: El Caso de Manizales, Colombia*, Septiembre 28–29, Manizales, Colombia.

Ng E, 2012, "Towards planning and practical understanding of the need for meteorological and climatic information in the design of high-density cities: A case-based study of Hong Kong," *International Journal of Climatology*, Vol. 32, No. 4, 582–598.

Ng E., Ren C. (eds.), 2015, *The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning*, London, Routledge.

Oke T.R., 1988, "Street design and urban canopy layer climate," *Energy and Buildings*, Vol. 11, No. 1–3, 103–113.

Oke T.R., 2006, *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*, IOM Report 81, Geneva, World Meteorological Organization.

Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A., 2017, *Urban Climates*, Cambridge University Press.

Ott W.R., 1977, "Development of criteria for siting air monitoring stations," *Journal of the Air Pollution Control Association*, Vol. 27, No. 6, 543–547.

Ren C., Ng E., Katzschner L., 2011, "Urban climatic map studies: A review," *International Journal of Climatology*, Vol. 31, No. 15, 2213–2233.

Roncancio D.N., 2013, *Study of heat island phenomenon in an Andean Colombian tropical city, case of study: Manizales-Caldas, Colombia*, MSc thesis, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

Scherer D., Fehrenbach U., Beha H-D., Parlow E., 1999, "Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban climate processes," *Atmospheric Environment*, Vol. 33, 4185–4193.

Steadman R.G., 1979, "The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 18, No. 7, 861–873.

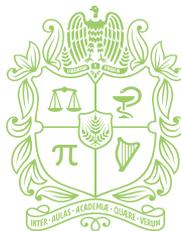
Stewart I.D., Oke T.R., 2012, "Local climate zones for urban temperature studies," *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 93, No. 12, 1879–1900.

Stewart I.D., Mills G., 2021, *The Urban Heat Island—A Guidebook*, Cambridge, USA, Elsevier.

UN & CORPOCALDAS. 2014. “CDIAC - Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas.” 2014. <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/>.

WMO (World Meteorological Organization), 2008, Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observations, 7th ed. WMO-No. 8, Geneva.

Zambrano Nájera J., Delgado V., Vélez Upegui J.J., 2020, “Short-term temperature variability in a tropical Andean city: Manizales, Colombia,” Revista Vinculos, Vol. 17, No. 2.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Instituto de Estudios Ambientales - IDEA -
Teléfono: 8879300 Ext. 50190
Cra 27 #64-60 / Manizales - Caldas
<http://idea.manizales.unal.edu.co>
idea_man@unal.edu.co

Edición, Diseño y Diagramación: IDEA Sede Manizales
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales