



Artículo

## Temperatura de la superficie terrestre y escenarios climáticos por el cambio de uso de suelo en los municipios metropolitanos del departamento de Santa Cruz, Bolivia

Land surface temperature and climatic scenarios for land use change in the metropolitan municipalities of the department of Santa Cruz, Bolivia

Boris Hinojosa Guzmán <sup>1\*</sup>, Oswaldo Maillard <sup>2</sup> & Diego Saucedo <sup>3</sup>

<sup>1</sup>HidroTierra, Servicios Integrales en Agua y Suelo, Av. 27 de Julio y Dorbigni, Cochabamba, Bolivia

<sup>2</sup>Fundación para la Conservación de Bosque Chiquitano. Av. Ibérica calle 6 Oeste 95, esq. Puerto Busch, Barrio Las Palmas, Santa Cruz, Bolivia

<sup>3</sup>Gobierno Autónomo Departamental de Santa Cruz, Av. Francisco Mora y 3er anillo interno, Santa Cruz, Bolivia

\*Autor de correspondencia: [stehino@gmail.com](mailto:stehino@gmail.com)

### Resumen

Se presenta el análisis de un estudio de caso basado en datos de la temperatura de la superficie terrestre (LST) en los diez municipios metropolitanos del Departamento de Santa Cruz y una proyección de los escenarios climáticos (CC) por el cambio de uso de suelo (CUS). Se obtuvo la LST diurna y nocturna, para el periodo 2010-2018 en base al producto diario MYD11A1 de MODIS. Se realizó un análisis de regresión lineal entre el LST con las temperatura máxima y mínima de dos estaciones meteorológica para los años 2010 y 2016. Para determinar el escenario actual de la temperatura regional se utilizaron los valores del MERRA-2 y para las proyecciones futuras de CC se seleccionaron los escenarios SRES (A1, A2, B1) y RCP (2.6, 4.5, 6.0 y 8.5). Se realizó una proyección de CUS con énfasis en el crecimiento urbano hasta el 2100 y posteriormente se realizó una sobreposición de los valores mensuales de los escenarios CC para SRES y RCP. Entre los resultados obtenidos, se evidencia que las temperaturas diurnas de las áreas boscosas LST son menores en comparación a las áreas urbanas (-2.4°C) y de uso agrícola/ganadero (-1.1°C). Se encontró una correlación significativa entre los valores de LST y las temperaturas del aire. En los escenarios futuros de CUS, las tendencias previstas son mayores para los municipios de Porongo, Warnes, Cotoca, Santa Cruz de la Sierra y El Torno. La dinámica en el CUS supone que influenciará en el incremento de las temperaturas máximas del aire CC, entre los 2.2-3.9°C para escenarios SRES y 0.7-4.1°C para RCP. En las temperaturas mínimas estos incrementos oscilan entre 2.4°C y 6.3°C para en SRES y 0-7-4.0°C en RCP.

**Palabras clave :** Bosques fragmentados, Eventos extremos, Sensores remotos, Urbanismo.

### Abstract

We present the analysis of a case study based on Land Surface Temperature (LST) data in the ten metropolitan municipalities of the Department of Santa Cruz and a projection of climate scenarios (CC) for Land Use Change (LUC). The day and night LST were obtained for the period 2010-2018 based on the daily product MYD11A1 of MODIS. A linear regression analysis was performed between the LST with the maximum and minimum temperatures of two meteorological stations for the years 2010 and 2016. The MERRA-2 values were used to determine the current regional temperature scenario and the SRES (A1, A2, B1) and RCP (2.6, 4.5, 6.0 and 8.5) scenarios were selected for future CC projections. A LUC projection was made with an emphasis on urban growth until 2100 and then the monthly values of the CC scenarios were superimposed for SRES and RCP. Among the results obtained, it is evident that the daytime temperatures of LST forest areas are lower compared to urban areas (-2.4°C) and agricultural/livestock use (-1.1°C). A significant correlation was found between LST values and air temperatures. In the future LUC scenarios, the predicted trends are higher for the municipalities of Porongo, Warnes, Cotoca, Santa Cruz de la Sierra and El Torno. The dynamics in LUC assume that it will influence the increase of maximum CC air temperatures, between 2.2°C and 3.9°C for SRES scenarios and 0.7°C and 4.1°C for RCP. At minimum temperatures these increases range from 2.4°C to 6.3°C for SRES and 0.7°C to 4.0°C for RCP.

**Key words:** Extreme events, Fragmented forests, Remote sensing, Urban planning.

## Introducción

La expansión urbana a nivel global, ha experimentado un crecimiento a gran escala (Wu 2014). Entre 1992 y 2016, la superficie terrestre urbana global aumentó 346.4 mil km<sup>2</sup> y tuvo un crecimiento de 1.3 veces (He *et al.* 2019). En el escenario de tendencias a futuro, las proyecciones muestran además que para el año 2100, la superficie de suelo urbano a nivel mundial podría oscilar entre 1.1-3.6 millones de km<sup>2</sup> (Gao & O'Neill 2020). El desarrollo urbanístico tiene un alto costo ambiental ya que se transforman muchos aspectos del medio ambiente en distintas escalas espaciales y temporales (Gao & O'Neill 2020). En éstos se incluye la conversión del uso de la tierra, en el que la vegetación natural se fragmenta, los hábitats y su biodiversidad se reducen, se acelera la pérdida de tierras agrícolas altamente productivas, se altera el clima, y se modifica los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos (Seto *et al.* 2011). El crecimiento urbano también es un determinante importante de la vulnerabilidad de los habitantes urbanos al estrés ambiental (Güneralp & Seto 2008). Al perderse la cobertura natural de la vegetación (bosque, pastizal, entre otros) se genera una mayor absorción de la radiación de onda corta del sol, liberando la radiación de onda larga después de unas pocas horas, lo que produce una sensación térmica aún mayor (Schwarz *et al.* 2011), provocado el fenómeno de las Islas de Calor Urbano conocidas como ICU (UHI en inglés). Las islas de calor se pueden describir como el fenómeno climático urbano inducido por el hombre que se caracteriza por temperaturas más altas en las áreas urbanas que en las áreas rurales circundantes (Manoli *et al.* 2019, Montaner-Fernández *et al.* 2020).

El crecimiento urbano y de las ciudades ha tenido un aporte importante en la variación climática, a través del uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las cuales causan un calentamiento adicional al que existe actualmente (Creutzig *et al.* 2015). Para obtener proyecciones climáticas futuras, los modelos climáticos se ejecutan bajo distintos escenarios de emisión de GEI y grados de desarrollo social o económico acordes con estas emisiones (IPCC 2014). Algunos de esos escenarios de emisiones de GEI provenientes de la actividad humana, dependen de factores socioeconómicos como el crecimiento de población, de la economía, de la tecnología, uso de energía, y otros (Nakicenovic *et al.* 2000).

En las últimas tres décadas, el departamento de Santa Cruz ha experimentado un crecimiento urbano mayor en comparación al resto del territorio boliviano, principalmente en el área de su ciudad capital, Santa Cruz de la Sierra, en el aspecto espacial (Duque *et al.* 2019), económico y demográfico (Kirshner 2013). Algunas de las razones que ocasionaron este crecimiento, están relacionadas con el desarrollo de la producción agrícola

(p.e. soya), ganadera y la extracción de gas (Arrieta *et al.* 1990, Pacheco & Mertens 2004, Kirshner 2013). La concentración demográfica experimentó un aumento considerable entre los años 1992 y 2001, lo cual estuvo estrechamente relacionada con el proceso de urbanización (Manzoni 2005). Desde entonces, los municipios metropolitanos sufren un proceso progresivo de cambio de uso de suelo que se registra anualmente en su territorio (Maillard *et al.* 2020). Un reciente estudio presentado por Spickenbom (2019) ha encontrado indicios de diferencias notables, entre las temperaturas del suelo registradas en el área de ciudad de Santa Cruz y las zonas circundantes con cobertura boscosa mejor conservadas.

En este sentido, es necesario modelar los escenarios del cambio de uso de suelo a futuro y su efecto en la temperatura del suelo, producto la expansión del área urbana, en los municipios metropolitanos del Departamento de Santa Cruz. Este estudio tiene el objetivo de 1) evaluar la temperatura de la superficie terrestre en el escenario actual y 2) analizar los cambios en la temperatura que se podrían producir en el futuro en base a la información de los modelos de circulación general (GCM) para estos municipios.

## Área de estudio

El área de estudio comprende los municipios metropolitanos del Departamento Santa Cruz, los cuales se encuentran ubicados entre la latitud 16°56' 49,28" S y longitud 64°12' 16,05" O y latitud 18°20'47,08" S y longitud 62°38'53,26" O, limitando al norte con los municipios de Santa Rosa del Sara, Mineros, General Saavedra y Okinawa Uno, al oeste con los municipios de San Carlos, Yapacani y Comarapa, al sur con los municipios de Mairana y Samaipata y al este con los municipios de Cabezas, Charagua y Pailón del Departamento de Santa Cruz (Fig. 1). La región presenta llanuras aluviales a onduladas con presencia de serranías, terrazas y colonias bajas dispersas también presenta condiciones buenas de terreno y moderadas de suelos para uso agrícola y pecuario que a la vez comprende una sucesión casi paralela de cadenas montañosas, serranías, de valles y terrazas de diferentes orígenes y amplitud (GADSC 2011). De acuerdo a los datos del último censo nacional de poblacional y vivienda (INE 2012), el departamento de Santa Cruz contaría con 2.6 millones de habitantes, ocupando el segundo lugar en el país y específicamente en los municipios metropolitanos, la población censada fue de 1.8 millones de habitantes.

## Métodos

### *Temperatura de la superficie terrestre (LST)*

La LST es uno de los parámetros más importantes en los procesos físicos de los balances de energía y agua de la

superficie desde las escalas locales hasta las globales (Mannstein 1987, Li *et al.* 2013, Neinavaz *et al.* 2020). Los datos infrarrojos térmicos de detección remota proporcionan mediciones de LST espacialmente continuas con cobertura global para examinar la heterogeneidad térmica de la superficie de la Tierra y el impacto en las temperaturas de la superficie como resultado de cambios naturales e inducidos por el hombre (Jin & Dickinson 2010, Li *et al.* 2015). En el presente estudio, se utilizaron los datos de la LST del producto diario MYD11A1 ver. 6 obtenido a partir del sensor MODIS del satélite Terra, de resolución espacial de 1 km por píxel (Wan *et al.* 2015), para el periodo comprendido entre 2010 y 2018. Los productos de temperatura y emisividad de la superficie terrestre de MODIS proporcionan valores de emisividad y temperatura por píxel en una secuencia de productos globales basados en franjas a productos

basados en cuadrículas. Para el presente estudio se descargaron datos LST para sitios específicos de las áreas metropolitanas desde la aplicación AppEEARS (Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples, <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appears/>), considerando áreas urbanas, agrícolas/ganaderas y bosques fragmentados. El producto MODIS LST original da la temperatura en grados Kelvin (°K). En este estudio, los valores de LST en Kelvin se convirtieron a temperatura Celsius (°C). Todos los píxeles con un error LST > 3°K se filtraron utilizando las correspondientes capas MODIS LST QA (capas de garantía de calidad en los archivos MODIS LST). Por lo tanto, los valores faltantes eran todos los píxeles para los que no se había producido ningún valor LST, así como todos los píxeles con un error LST > 3°K. El filtrado de valores atípicos se realiza en una etapa posterior.

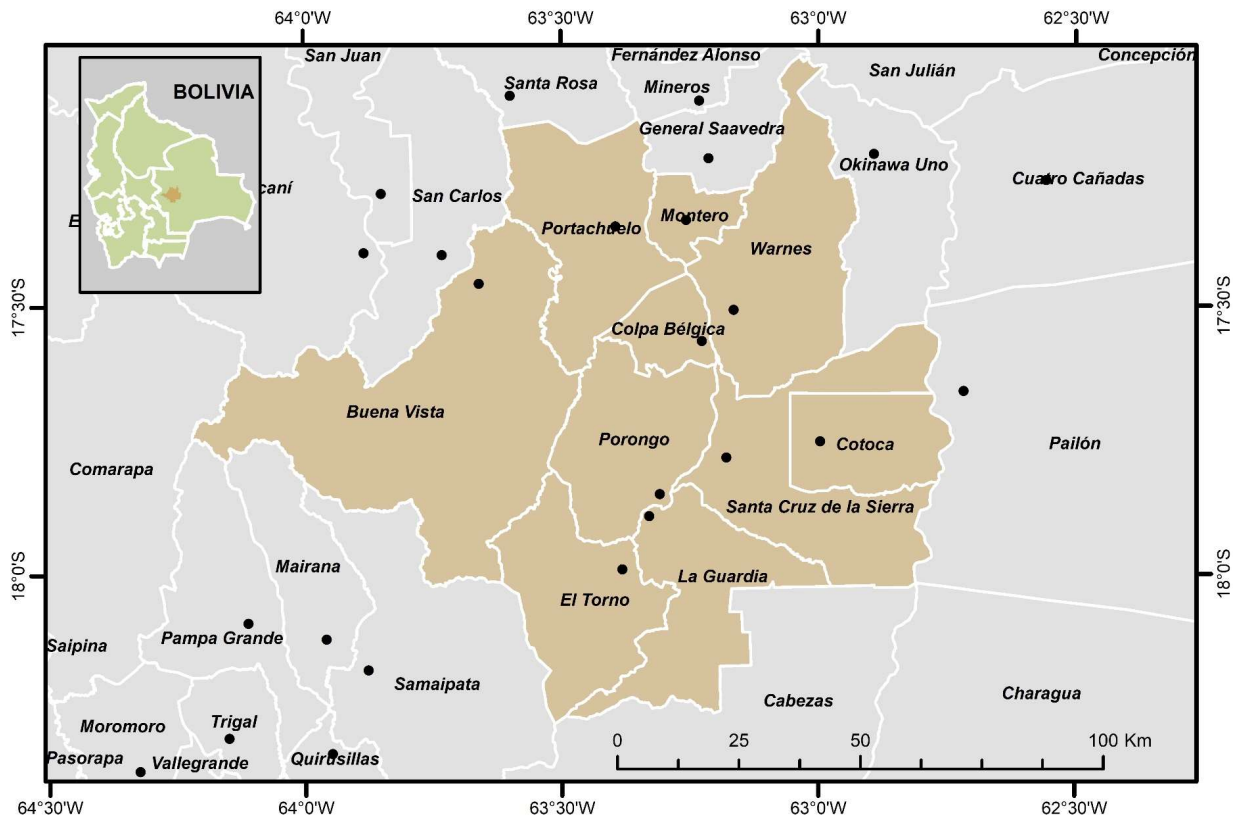


Figura 1. Municipios metropolitanos del Departamento de Santa Cruz.

#### *Relación entre la LST y la temperatura del aire*

Se realizó un análisis de correlación lineal de Pearson entre el LST día con información de temperatura máxima y LST noche con los datos de temperatura mínima para los años 2010 y 2016 proveniente de la estación del aeropuerto el Trompillo y Viru Viru (SENAMHI, <http://senamhi.gob.bo>).

#### *Escenario actual de la temperatura del aire*

Con la finalidad de poder determinar el escenario actual

del clima entre 2010 y 2018 para el área de estudio, se descargaron desde la aplicación Climate Engine (<https://appclimateengine.org>) los valores promedio de temperatura del aire (máxima, mínima) del MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) creado por la GMAO (Global Modelling and Assimilation Office) de la NASA, el cual presenta una resolución espacial de 0.5° (Gelaro *et al.* 2017). MERRA-2 utiliza el modelo de circulación general atmosférica

GEOS-5 (Goddard Earth Observing System-5) y el sistema de análisis de interpolación estadística de asimilación de datos variación tridimensional 3DVar.

#### *Proyecciones de temperatura a futuro*

Para el presente estudio se seleccionaron los posibles futuros escenarios de emisión en base a SRES (Special Report on Emissions Scenarios) y RCP (Representative Concentration Pathways). Las dos principales variables estudiadas en los escenarios SRES y RCP, temperatura del aire, se basaron en los modelos de circulación general (GCM) descargados del portal del CCAFS (CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security, [www.ccafs-climate.org](http://www.ccafs-climate.org)). Los escenarios socioeconómicos del SRES utilizados en el Tercer y Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC 2007), se diferencian en cuatro: A1, A2, B1 y B2. Los escenarios RCP utilizados en el Quinto Informe de Evaluación (IPCC 2014) son cuatro: RCP2.6, RCP4.5, RCP 6.0 y RCP8.5. Los RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos simples, modelos de química de la atmósfera y modelos del ciclo del carbono, que estiman concentraciones de CO<sub>2</sub> que podrían llegar entre 421 ppm (RCP2.6), 538 ppm (RCP4.5), 670 ppm (RCP6.0) y 936 ppm (RCP8.5) hasta el fin de este siglo (IPCC 2014).

Se realizó la prueba de normalidad de Jarque-Bera ( $p < 0.5$ ), basada en el coeficiente de asimetría y curtosis. Las funciones descriptivas de las series de tiempo, muestran la evolución de la función de autocorrelación y de la autocorrelación parcial con un intervalo de confianza al 95% para los escenarios considerados SRES y RCP.

#### *Escenarios futuros de cambio de uso de suelo (CUS)*

Para estudiar las variables de cambio y de proximidad a nivel de píxel se realizaron tres modelos de redes neuronales usando la herramienta Land Change Modeler (LCM) del programa TerrSet (Eastman 2015). Las capas de cambio de usos de suelos empleadas como base fueron los productos elaborados por el SERNAP (2013) para el año 2010, el cual fue actualizado en este estudio para toda la actividad antrópica que ocurrió hasta el año 2018. En este sentido, para los escenarios futuros del cambio de uso de suelo a corto (2030), mediano (2050) y largo (2100) plazo, fueron proyectados considerando los escenarios que consideraban el cumplimiento de las políticas públicas que definen zonas de restricción de acuerdo al derecho propietario que es asignado por el Plan de Usos de Suelos (PLUS) del Departamento de Santa Cruz, así como la existencia de espacios de conservación de la biodiversidad a través de áreas protegidas, el acceso a los mercados y a la tendencia de crecimiento urbano que siguen las urbanizaciones para los municipios metropolitanos. Esta información cartográfica fue proporcionada por el Gobierno Autónomo

Departamental de Santa Cruz. Para cada cambio de uso de suelos, la superficie esperada fue calculada y localizada en un mapa de probabilidades. Las celdas a ser convertidas se seleccionaron consecutivamente según su probabilidad de conversión hasta llegar a la superficie total de cambio del suelo esperado. Para las proyecciones de CUS se incorporó la proyección de construcción de infraestructura (puentes del Bicentenario, Urubo Village, Metropolitano 1, 6to anillo norte y 8vo anillo sur) que conecta a los Municipios de Santa Cruz de la Sierra y Porongo. También se incorporaron las áreas protegidas de interés nacional y departamental del Departamento de Santa Cruz.

#### *Proyecciones futuras de temperatura - cambio de uso de suelo*

Se realizó un muestreo aleatorio estratificado de 128 puntos en el área de los municipios metropolitanos con el programa ArcMap y se realizó una sobreposición de los valores mensuales de los escenarios de las proyecciones de la temperatura del aire máxima y mínima para SRES y RCP, en relación a los resultados obtenidos en el análisis de los cambios de cobertura del suelo hasta 2100. Se obtuvieron valores promedio de la temperatura máxima y mínima por décadas y se calculó el incremento acumulado hasta 2080.

## **Resultados**

#### *Temperatura de la superficie terrestre (LST)*

Entre 2010 y 2018, la temperatura diurna promedio (LST/día) registrada en las áreas boscosas ( $28.6^{\circ}\text{C} \pm 1.1$ ) en los diez municipios (Tabla 1), muestra una diferencia de  $-1.1^{\circ}\text{C}$  en relación a las de uso agrícola/ganadero ( $29.7^{\circ}\text{C} \pm 1.6$ ) y  $-2.4^{\circ}\text{C}$  en comparación a las áreas de uso urbano ( $31.0^{\circ}\text{C} \pm 2.0$ ). La temperatura nocturna promedio (LST/noche) de los bosques fragmentados ( $20.6^{\circ}\text{C} \pm 0.4$ ) presentó disimilitud de  $0.1^{\circ}\text{C}$  con las de uso agrícola/ganadero ( $20.4^{\circ}\text{C} \pm 0.5$ ) y  $-0.7^{\circ}\text{C}$  con las urbanas ( $21.3^{\circ}\text{C} \pm 0.5$ ). En el LST/día registrado para los bosques tuvo una diferencia de  $8.1^{\circ}\text{C}$  en relación a la LST/noche, mientras que fue aún mayor en áreas de uso agrícola/ganadero ( $9.3^{\circ}\text{C}$ ) y urbano ( $9.7^{\circ}\text{C}$ ).

#### *Relación entre la LST y la temperatura del aire*

Los resultados indican que para el aeropuerto Viru Viru, existe una correlación significativa ( $p > 0.001$ ) y positiva más alta entre las temperaturas mínimas y los valores del LST/noche para los años 2010 ( $r = 0.88$ ) y 2016 ( $r = 0.87$ ), en comparación a las temperaturas máximas y LST día para 2010 ( $r = 0.75$ ) y 2016 ( $r = 0.74$ ). Algo similar ocurre en el área del aeropuerto El Trompillo, donde existe también una correlación significativa ( $p > 0.001$ ), siendo la más alta entre las temperaturas mínimas y los valores del LST/noche para los años 2010 ( $r = 0.81$ ) y 2016 ( $r = 0.80$ ), en comparación a las temperaturas máximas y LST día para 2010 ( $r = 0.78$ ) y 2016 ( $r = 0.79$ ).

Tabla 1. Temperatura de la superficie terrestre (LST) diurna y nocturna (°C) para el período 2010-2018, en tres clases de cobertura del suelo (bosque, urbano, agrícola/ganadero) en los diez municipios metropolitanos del departamento de Santa Cruz. +/- = Diferencia de temperaturas.

Municipio	Sitio	Lat	Lon	LST/día		LST/noche		+ / -
				Rango	x	Rango	x	
Buena Vista	Urbano, centro	-17.460469	-63.660234	17.9-36.1	28	5.5-25.8	20.9	7.1
	Agricultura/Ganadería	-17.480896	-63.673414	16.8-36.3	26.8	7.2-25.9	19.7	7.1
	Bosque	-17.47216	-63.663504	18.7-35.4	27.2	8.9-25.4	20.4	6.8
Colpa Bélgica	Urbano, centro	-17.566723	-63.230715	17.6-40.9	29.6	5.7-26.8	20.4	9.2
	Agricultura/Ganadería	-17.550122	-63.234294	18.5-43.3	29.1	5.8-26.9	20.5	8.6
	Bosque	-17.573072	-63.252258	18.6-43.8	29.2	4.4-27.0	20.5	8.7
Cotoca	Urbano, centro	-17.754397	-62.996138	17.9-41.7	30.6	4.3-28.1	21.1	9.5
	Agricultura/Ganadería	-17.756063	-62.906982	17.3-45.7	31.2	5.9-27.8	20.6	11
	Bosque	-17.732029	-62.975251	17.2-43.1	29.8	6.1-27.7	20.5	9.3
El Torno	Urbano, centro	-17.991619	-63.382829	18.9-40.3	29.2	5.5-27.2	20.5	8.7
	Agricultura/Ganadería	-18.031882	-63.412754	18.2-39.1	28.4	4.7-27.1	19.9	8.5
	Bosque	-18.018599	-63.367375	17.5-37.7	27.1	4.4-26.9	20.2	6.9
La Guardia	Urbano, centro	-17.891937	-63.330971	17.8-38.5	29.5	5.9-27.6	21.5	8
	Agricultura/Ganadería	-17.898133	-63.305415	17.4-39.6	29.6	4.2-26.9	20.6	9
	Bosque	-17.915946	-63.340905	16.0-36.1	26.9	4.5-26.6	20.3	6.6
Montero	Urbano, centro	-17.341988	-63.255629	19.5-43.0	32.7	3.6-27.5	22.1	11
	Agricultura/Ganadería	-17.290704	-63.217206	20.8-44.1	30.9	5.1-25.5	20.5	10
	Bosque	-17.282138	-63.300373	18.3-38.9	28.8	7.5-25.7	20.7	8.1
Portachuelo	Urbano, centro	-17.354854	-63.39478	15.6-42.4	30.9	7.4-25.8	20.9	10
	Agricultura/Ganadería	-17.37029	-63.374943	14.7-41.8	29.5	6.0-25.0	20	9.5
	Bosque	-17.299097	-63.425955	17.7-41.4	30.3	6.3-25.5	20.3	10
Porongo	Urbano, centro	-17.853443	-63.308891	16.7-36.5	27.5	4.1-26.6	20.3	7.2
	Agricultura/Ganadería	-17.847277	-63.294898	16.4-39.1	28.7	5.2-26.0	20.4	8.3
	Bosque	-17.861283	-63.291672	13.9-37.5	28.2	5.1-26.5	20.3	7.9
Santa Cruz de la Sierra	Urbano, centro	-17.783254	-63.182006	10.1-42.3	33.6	5.5-29.2	22.5	11
	Urbano, Aeropuerto El Trompillo	-17.808251	-63.175276	17.8-42.2	33.2	5.4-29.0	22.4	11
	Urbano, Parque Industrial	-17.758807	-63.14271	14.6-41.8	33	4.1-27.7	21.5	12
	Urbano, Villa Olímpica	-17.827771	-63.191533	17.0-32.7	32.7	4.1-27.7	21.5	11
	Agricultura, Cañaverales de Santa Aurelio	-17.844533	-63.135712	17.5-42.0	32.3	5.3-28.0	21.6	11
	Bosque, Jardín Botánico Bosque, Cordón Ecológico del Pirai	-17.778826	-63.064824	16.6-39.8	29.3	4.4-27.9	20.9	8.4
Warnes	Urbano, centro	-17.510413	-63.164602	20.5-41.8	31.1	6.0-27.6	21.6	9.5
	Agricultura/Ganadería	-17.484029	-63.168392	8.4-43.3	30.9	6.9-25.4	20.6	10
	Bosque	-17.529544	-63.205737	18.0-38.4	28.7	5.1-26.7	20.5	8.2
	Urbano, Aeropuerto Viru Viru	-17.647235	-63.139277	21.0-47.3	32	6.1-27.2	20.8	11

*Escenario actual de la temperatura del aire*  
Para una escala regional de los diez municipios metropolitanos del departamento de Santa Cruz, los datos

provenientes del MERRA-2 para el periodo 2010-2018 muestran que temperatura máxima promedio de 28.9°C y mínima promedio de 18.1°C (Fig. 2). En el mes de

diciembre se registran los valores promedio de 31.0°C/21.2°C que descienden en febrero a 28.7°C/20.6°C (Fig. 2). En marzo se tienen promedios de temperaturas de 29.1°C/20.0°C que bajarán a 27.1°C/16.9°C en mayo (Fig. 2). Entre junio y agosto los valores muestran temperaturas de 26.5°C/15.7 a 29.6°C a 16.3°C con los registros más bajos de temperatura mínima en julio (14.8°C). Los rangos promedios mensuales de septiembre a noviembre registran temperaturas de 32.3°C/18.9°C a 31.8°C/20.8°C con la máxima más alta en el mes de octubre (32.5°C).

#### Proyecciones de temperatura a futuro

En la familia de escenarios SRES, las estimaciones indican que la temperatura máxima del aire podría incrementarse en el periodo 2020-2080 (Tabla 2), entre los 2.2°C (B1) a 3.9°C (A1B), en tanto que a temperatura mínima podría aumentar entre las 2.4°C (B1) y 6.2°C (A2). Sin embargo, en las proyecciones RCP para el periodo 2030-2080, la variable de temperatura máxima del aire posee un

comportamiento lineal oscilando entre los 0.7°C para RCP 2.6 y 4.1°C para RCP 8.5 y la temperatura mínima presenta un comportamiento exponencial en incremento con un incremento entre 0.6°C para RCP 2.6 y 3.9°C para RCP 8.5 (Tabla 2).

#### Escenarios futuros de cambio de uso de suelo

Hasta 2018, el municipio con mayor superficie de territorio con uso urbano fue Santa Cruz de la Sierra con 34,8 mil ha (Tabla 3, Fig. 3). Pero este panorama podría cambiar drásticamente en un escenario futuro. La simulación de cambio de uso de suelo de bosque, no bosque (sabanas, matorrales) y/o áreas de uso agrícola/ganadero en área urbana, proyectado desde el año 2018 hasta el 2100 (Tabla 3), indica una tendencia de crecimiento adicional al actual de tipo exponencial, principalmente para los municipios de Porongo (56.6 mil ha), Warnes (44.9 mil ha), Cotoca (25.5 mil ha), Santa Cruz de la Sierra (23.7 mil ha) y El Torno (22.7 mil ha) (Tabla 3).

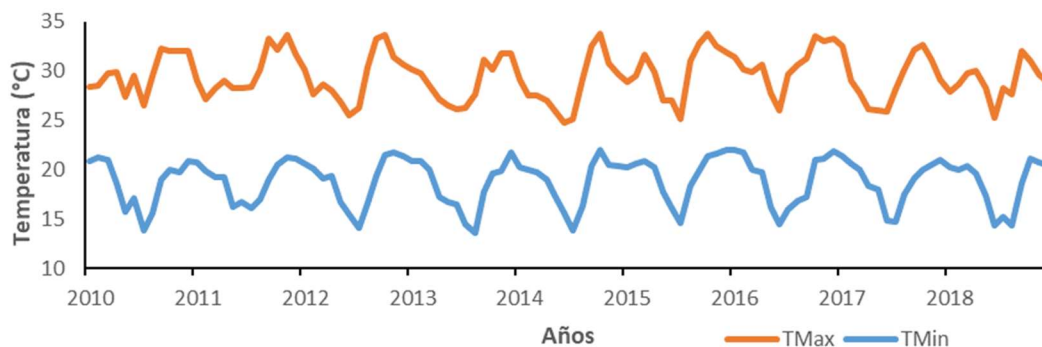


Figura 2. Temperatura máxima y mínima para el periodo 2010-2018 en base a datos de MERRA-2.

Tabla 2. Proyecciones de temperatura (°C) en los municipios metropolitanos hasta el año 2080, en base a familia de escenario SRES (A1B, A2, B1) y RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5). Los valores con asterisco (\*) indican significancia en el nivel de confianza ( $p < 0.5$ ) en la prueba de normalidad de Jarque-Bera. +/- = Diferencias de estimaciones de temperatura del aire entre el año inicial y final.

Familia de escenarios	Variables	$p$	2030	2050	2070	2080	+/-
SRES	A1B	0.714	30.1	31.2	32.3	33.3	3.9
	A2	0.772	29.8	30.8	32.8	33.0	3.2
	B1	0.640	29.7	30.6	32.1	32.3	2.2
	A1B	0.111*	15.8	19.2	17.9	21.2	5.9
	A2	0.084*	17.8	18.9	17.9	21.1	6.2
	B1	0.030*	17.7	18.6	16.7	17.3	2.4
RCP	RCP 2.6	0.289*	30.9	31.3	31.6	31.6	0.7
	RCP 4.5	0.553	30.6	32.0	32.6	32.8	2.2
	RCP 6.0	0.626	30.3	31.0	32.1	32.7	2.4
	RCP 8.5	0.845	30.8	32.4	34.1	34.9	4.1
	RCP 2.6	0.091*	18.6	19.0	19.3	19.3	0.6
	RCP 4.5	0.120*	17.4	17.5	18.0	18.2	0.8
	RCP 6.0	0.180*	18.2	18.9	19.8	20.3	2.1
RCP 8.5	0.308*	18.7	20.2	21.8	22.6	3.9	

Tabla 3. Proyección de crecimiento del área urbana (ha) a corto (2030), mediano (2050) y largo (2100) plazo en los municipios metropolitanos de Santa Cruz. +/- = Diferencia de crecimiento urbano entre 2018 y 2100.

Municipios	1990	2000	2010	2018	2030	2050	2100	+/-
Buena Vista	87	95	116	212	921	2.093	4.963	4.751
Colpa Bélgica	15	15	119	5.725	10.729	19.059	24.907	19.182
Cotoca	304	373	1.196	3.077	7.175	13.506	28.590	25.513
El Torno	153	153	453	1.134	5.472	9.629	23.885	22.751
La Guardia	1.768	1.768	3.237	5.903	7.733	11.390	15.208	9.305
Montero	1.477	1.496	2.730	4.136	7.699	12.478	19.840	15.704
Porongo	14	14	411	8.473	23.604	48.599	65.112	56.639
Portachuelo	179	179	279	3.832	7.628	13.598	24.761	20.929
Santa Cruz de la Sierra	23.432	23.432	28.676	34.880	36.744	44.556	58.622	23.742
Warnes	372	372	4.152	11.636	17.300	33.015	56.585	44.949
Total	27.802	27.897	41.369	79.008	125.004	207.923	322.473	243.465

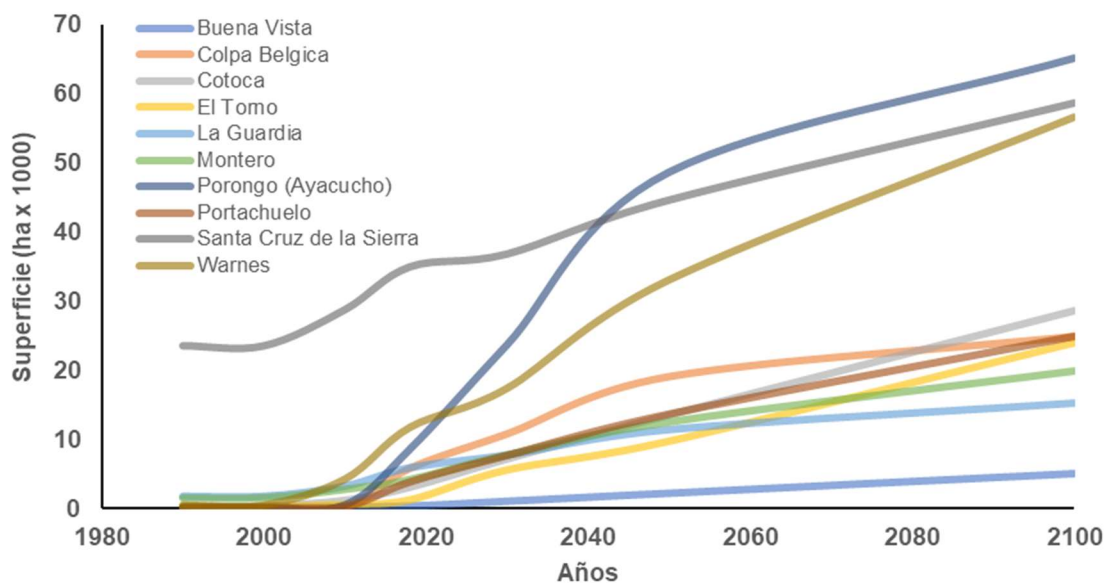


Figura 3. Proyección del crecimiento urbano para el año 2100 en el municipio de Santa Cruz de la Sierra y metropolitanos.

#### Proyecciones futuras de temperatura - cambio de uso de suelo

Si el cambio de uso de suelo se incrementara en los municipios metropolitanos, también aumentarían las temperaturas de aire en los escenarios climáticos SRES y RCP (Fig. 4). En el escenario A1B de SRES, la proyección de la temperatura máxima se incrementa en 3.9°C (rango = 0.4–1.0°C), 3.2°C (0.0–1.1°C) para A2 y 2.2°C (-0.7–1.1°C) para B1 (Fig. 4). En la temperatura mínima, se espera un incremento de 6.1°C (rango = -1.8–3.4°C) para A1B, 6.3°C (rango = -2.1–3.3°C) para A2 y 2.4°C (rango = -2.3–3.2°C) para B1 (Fig. 4).

En cuanto a los escenarios RCP, los valores de temperatura máxima y mínima también tienden a incrementarse en relación al cambio de uso de suelo en el periodo 2030-2080 (Fig. 5). En la temperatura máxima, el escenario RCP 2.6 evidencia un aumento en 0.7°C, 2.2°C en RCP 4.5, 2.4°C en RCP 6.0 y 4.1°C en RCP 8.5. Para la temperatura

mínima en el RCP 2.6 se estima un incremento de 0.7°C, 0.8°C en RCP 4.5, 2.1°C en RCP 6.0 y 4.0°C en RCP 8.5 (Fig. 5).

#### Discusión

El cambio de uso de suelo provoca directamente cambios en las características físicas de la superficie terrestre, lo que afecta una variedad de factores que determinan el clima regional, como la radiación, el calor y el intercambio de vapor de agua (Foley 2005). En este sentido, las funciones inherentes de los bosques, tienen un rol muy importante en la regulación del agua y el clima a nivel regional y local. Los bosques ofrecen soluciones para el enfriamiento del suelo, debido a la capacidad que tienen los árboles para capturar y redistribuir la energía del sol (Pokornýa *et al.* 2010). Este fenómeno de enfriamiento es evidenciable en los resultados obtenidos para los municipios metropolitanos. Los resultados obtenidos en los análisis de



LST/día, indican que las temperaturas promedio del bosque son inferiores en relación a las áreas urbanas (-2.4°C) y a las de uso agrícola/ganadero (-1.1°C), en tanto que en LST/noche, estas diferencias son aún menores. Estos análisis son muy importantes ya que demuestran la

importancia de conservar y mantener las áreas boscosas remanentes cercanas a las ciudades y hacer una mejor planificación en el crecimiento urbano, con la finalidad de regular la temperatura del suelo y amortiguar los impactos del clima (Spickenbom 2019).

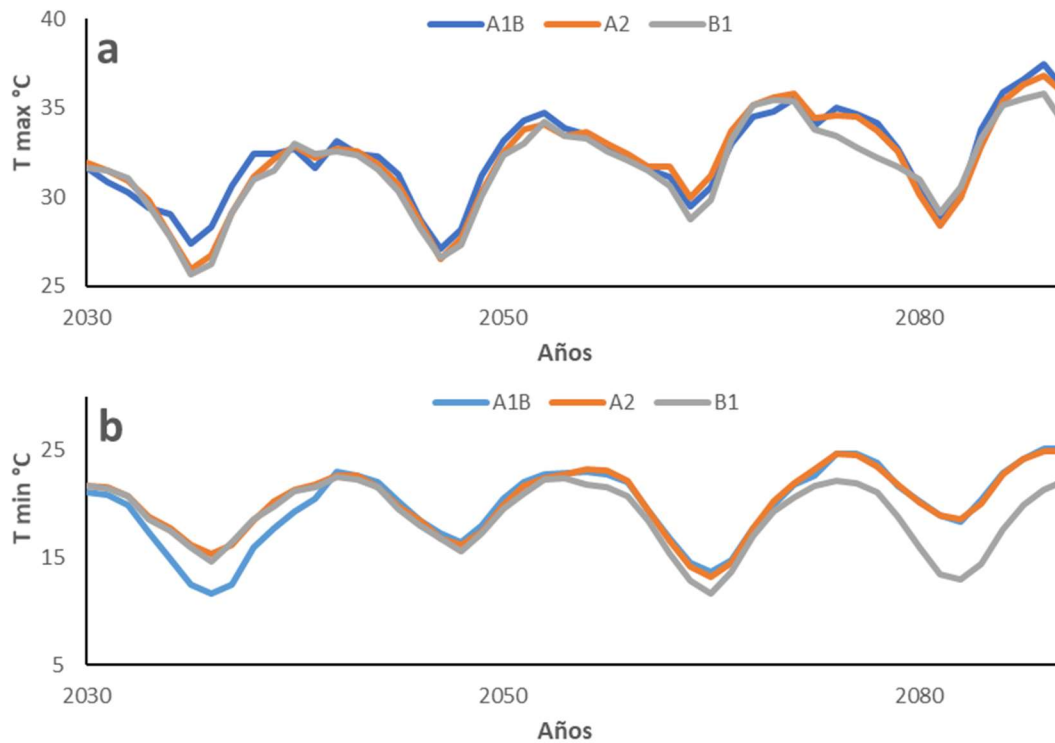


Figura 4. Proyecciones de la temperatura. a. Máxima y b. mínima para escenarios SRES A1B, A2 y B1, en relación al cambio de uso de suelo.

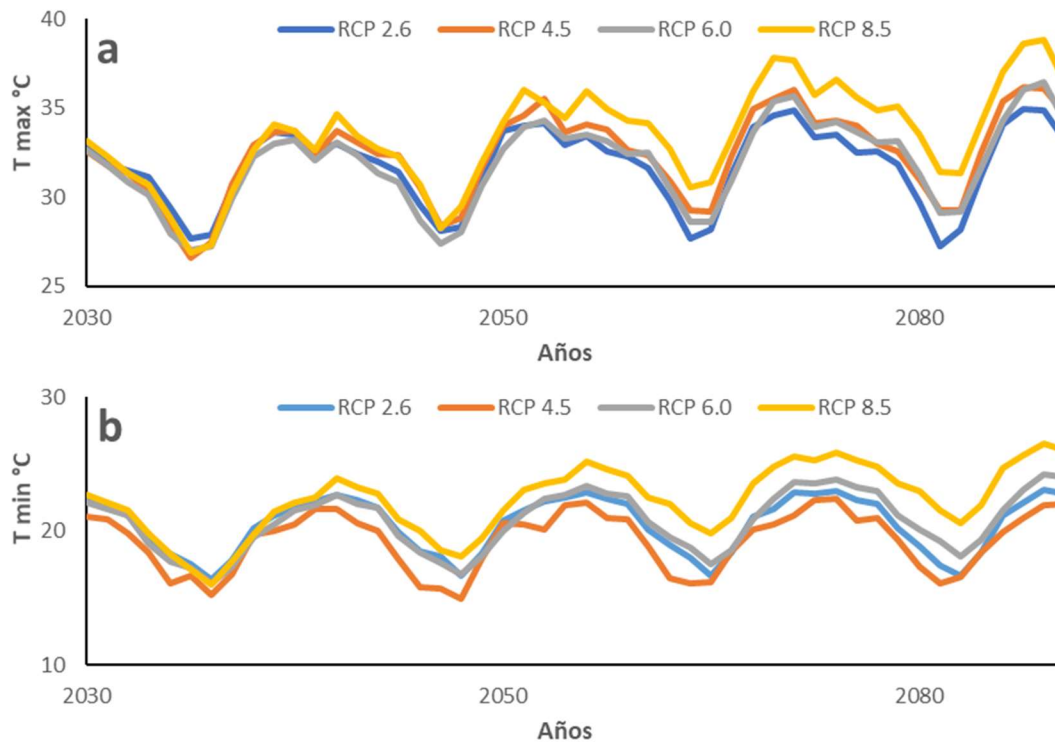


Figura 5. Proyecciones de la temperatura. a. Máxima y b. mínima para escenarios RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5, en relación con el cambio de uso de suelo.



En los últimos años se han desarrollado múltiples estudios para determinar la temperatura a partir de la LST a nivel global (p.e., Parastatidis *et al.* 2017, Mildrexler *et al.* 2018), ya que la LST proporciona una medida más directa de las condiciones de la superficie y es la cantidad más relevante para medir cuando se analizan las interacciones superficie-clima (Li *et al.* 2013). La LST se estima a partir de la emisión de radiación térmica desde la superficie real del terreno donde la energía solar entrante interactúa con el suelo y lo calienta, en tanto que la temperatura del aire de la estación meteorológica estándar se mide con sensores protegidos contra la radiación y adecuadamente ventilados, por lo que existen diferencias (Mildrexler *et al.* 2011). Sin embargo, los resultados obtenidos para los municipios metropolitanos, muestran correlaciones significativas para los dos años y sitios de evaluación, entre la temperatura del suelo y del aire, pero en dos áreas donde estaban instaladas las estaciones meteorológicas (aeropuertos). Las diferencias de los datos se pueden deber al horario en que los satélites de MODIS registran información en esta región. Sin embargo, los datos meteorológicos son difíciles de obtener, lo que genera dificultades para realizar investigaciones a gran escala y a largo plazo. En cambio, el monitoreo del LST con teledetección, ofrece una serie de ventajas en un amplio rango de observación, fácil acceso y una fuerte continuidad espacial.

Muchos de los problemas ambientales en las ciudades son precisamente consecuencia de una mala planificación y una administración pública deficiente (UN-Habitat 2008). De los diez municipios metropolitanos, el mayor problema se ha concentrado en los últimos años, en el área de Santa Cruz de la Sierra. Esta ciudad duplicó su población para el periodo 1992-2009, convirtiéndose en la ciudad de más rápido crecimiento con una tasa de crecimiento anual de 4.8% el doble de la tasa de todas las otras ciudades de los países de la región andina (Parés-Ramos *et al.* 2013), pero carente de una adecuada planificación (Parés-Ramos *et al.* 2013). Sin embargo, municipios como Porongo (oeste del río Pirai), han tenido un vertiginoso crecimiento del área urbana en la última década (Urubó) y las proyecciones a futuro muestran una tendencia a incrementarse de tipo exponencial, lo cual podría originar, severas consecuencias al suministro de agua de las áreas urbanas (Castelli *et al.* 2017). El incremento de la temperatura, la mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos, que derivan en desastres naturales, requiere de estrategias de adaptación al cambio climático basada en el mantenimiento de la integridad de los bosques, donde se debe priorizar la conservación de los bosques existentes y la restauración de los que se han perdido producto de la deforestación (Maillard 2020).

En las zonas urbanas, las proyecciones de los escenarios climáticos indican un aumento de los riesgos para las

personas, los recursos, las economías y los ecosistemas, incluidos los riesgos derivados del estrés térmico, las tormentas y precipitaciones extremas, las inundaciones, los deslizamientos de tierra, la contaminación del aire, las sequías, la escasez de agua (IPCC 2014). Los riesgos en áreas urbanas se agravan para las personas que carecen de infraestructuras y servicios esenciales o viven en zonas vulnerables (Margulis 2016). Las áreas urbanas y rurales pueden responder de manera diferente al cambio climático debido a las variaciones en la cobertura de nubes, velocidad del viento, evapotranspiración y liberación de calor antropogénico (McCarthy *et al.* 2010, Oleson 2012, Hoffmann & Schluenzen 2013). El crecimiento de la población y la urbanización ha provocado el fenómeno ICU. Algunos estudios sugieren que los escenarios de cambio climático también impactarán al efecto ICU (Alcoforado & Andrade 2008, Musco 2016) en algunos casos aumentando la temperatura y en otros disminuyéndola, por lo que futuras investigaciones sobre las anomalías térmicas a futuro deben incluir el crecimiento urbano. Argueso *et al.* (2014) encontraron que los cambios climáticos en el escenario A2 aumentarían las temperaturas máximas en 1–2.5 ° C para el año 2059 en la ciudad de Sydney. Adachi *et al.* (2012) identificaron que el impacto de la urbanización en la ciudad de Tokio agregó 0.5°C al ICU preexistente de 1°C, mientras que bajo el escenario de cambio climático A1b, las temperaturas aumentarían de manera uniforme en áreas urbanas y rurales en 2080. En Beijing, las urbanizaciones contribuirán con un 13-17% del calentamiento futuro, mientras que en el escenario RCP 8.5 se muestra que será responsable de más del 80% del calentamiento urbano para el año 2050 (Yang *et al.* 2016). Una mejor comprensión de los procesos a través de los cuales el cambio climático puede aumentar o disminuir el efecto ICU ayudará a identificar áreas urbanas especialmente vulnerables que tendrán aumentos más altos en las temperaturas que subestiman el cambio de lo esperado (Chapman *et al.* 2017).

La temperatura y la precipitación son dos variables que marcan las tendencias de cambio climático inducidas tanto por factores naturales como por los cambios que han generado las actividades humanas en el planeta (IPCC 2014). Varios estudios han utilizado modelos de circulación general (GCM) para determinar la posible evolución futura del clima en la región, los cuales muestran un panorama más seco y cálido durante la estación de estiaje. Marengo (2012) demostró que los GCM predecían un calentamiento sustancial (4-6°C) para fines del siglo XXI en América del Sur continental y mayores aumentos en las regiones costeras. Las estimaciones para Bolivia, en especial para la región de los municipios metropolitanos, el escenario proyectado de las fluctuaciones de la temperatura bajo el escenario de emisiones A2 para el año 2030,

muestra que las temperaturas para la época húmeda (noviembre-enero) en esta área podrían incrementarse en un rango de 1.03-1.39%, en tanto que para la época seca (junio-agosto), la temperatura podría incrementarse entre 1.29-1.54% (FAN 2015). En los municipios metropolitanos del presente estudio se encontró que la dinámica del CUS influenciará en el incremento de las temperaturas del aire por CC en los escenarios SRES y RCP, con niveles de 0.7-4.1°C en las máximas y 0.7-2.4°C en las mínimas. Aunque, es importante resaltar que estos resultados se basan en un análisis aproximado ya que la tendencia del cambio climático bajo los diferentes escenarios planteados, siguen una tendencia divergente, según a la familia de escenarios a la que pertenecen. En este sentido, los escenarios SRES y RCP se centra en las emisiones antropogénicas y no incluyen cambios en impulsores naturales como el forzamiento solar o volcánico o las emisiones de CH<sub>4</sub> o N<sub>2</sub>O (IPCC 2014) lo cual representa un cambio sustancial en el clima para el planeta y por ende se estaría sobreestimando el cambio climático en las áreas metropolitanas del departamento de Santa Cruz. Además, futuras investigaciones deben considerar la familia de escenarios SSP, conocidos como las Vías Socioeconómicas Compartidas, que combinan el desarrollo socioeconómico y tecnológico (O'Neill *et al.* 2013, 2017).

### Conclusiones

Se encontró una variación de las temperaturas de la superficie terrestre registradas en los relictos boscosos, especialmente en las diurnas, las cuales fueron menores en comparación a las áreas urbanas y de uso agrícola/ganadero. Pero es evidente que estas temperaturas de suelo, las cuales se ha comprobado en este estudio que están correlacionadas a las del aire, puedan incrementarse en el futuro, considerando las proyecciones de escenarios climáticos y el cambio de uso del suelo, debido principalmente al incremento del área urbana. Estas temperaturas podrían incrementarse en los escenarios climáticos en las máximas y las mínimas, por lo que es necesario desarrollar una mejor planificación del crecimiento del área urbana en los municipios metropolitanos, especialmente en Porongo, Warnes, Cotoca, Santa Cruz de la Sierra y El Torno. Una de estas estrategias de adaptación climática sería mantener áreas boscosas poco fragmentadas con una mejor planificación del territorio en los diez municipios que permita regular estas temperaturas.

### Agradecimientos

A los revisores anónimos, por sus importantes contribuciones al manuscrito.

### Referencias

Adachi, S.A., F. Kimura, H. Kusaka, T. Inoue & H. Ueda. 2012. Comparison of the impact of global climate

changes and urbanization on summer time future climate in the Tokyo metropolitan area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51(8): 1441-1454.

- Alcoforado, M.J. & H. Andrade. 2008. Global Warming and the Urban Heat Island. Pp 249-262 en: Marzluff, J., E. Shulenberg, W. Endlicher, M. Alberti, G. Bradley, C. Ryan, C. ZumBrunnen, & U. Simon (eds) *Urban Ecology*. Springer, Boston.
- Argueso, D., J.P. Evans, L. Fita & K.J. Bormann. 2014. Temperature response to future urbanization and climate change. *Climate Dynamics* 42(7-8): 2183-219.
- Arrieta, M., G. Abrego, A. Castillo & M.D.I. Puente. 1990. *Agricultura en Santa Cruz: de la encomienda colonial a la empresa modernizada (1559-1985)*. Instituto Latinoamericano de Investigación Social, La Paz.
- Castelli, G., C. Foderi, B.S. Hinojosa, L. Ossoli, Y. Kempff, E. Bresci & Fabio Salbitano. 2017. Planting waterscapes: green infrastructures, landscape and hydrological modeling for the future of Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. *Forests* 8(11): [doi:10.3390/f8110437](https://doi.org/10.3390/f8110437)
- Chapman, S. J. E., M. Watson, A. Salazar, M. Thatcher & C. A. McAlpine. 2017. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecology* 32(10): 1921-1935.
- Creutzig, F., G. Baiocchi, R. Bierkandt, P.P Pichler & K.C. Seto. 2015. Global typology of urban energy use and potentials for an urbanization mitigation wedge. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112: 6283–6288.
- Duque, J. C., N. Lozano-Gracia, J.E. Patino, P. Restrepo & W.A. Velasquez. 2019. Spatiotemporal dynamics of urban growth in Latin American cities: An analysis using nighttime light imagery. *Landscape and Urban Planning* 91: <http://hdl.handle.net/10986/31170>
- Eastman, R.J. 2015. *TerrSet Manual*. Clark University, Worcester.
- FAN (Fundación Amigos de la Naturaleza). 2015. *Atlas socioambiental de las tierras bajas y Yungas de Bolivia*. Editorial FAN, Santa Cruz.
- Foley, J.A. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309: 570–574.
- Gelaro, R., W. McCarty, M.J. Suárez, R. Todling, A. Molod, L.Takacs, C.A. Randles, A. Darmenov, M. Bosilovich, R. Reichle et al. 2017. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate* (14): 5419-5454.
- He, C., Z. Liu, S. Gou, Q. Zhang, J. Zhang & L. Xu. 2019. Detecting global urban expansion over the last

- three decades using a fully convolutional network. *Environmental Research Letters* 14(3): <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaf936>
- Hoffmann, P. & K.H. Schlünzen. 2013. Weather pattern classification to represent the urban heat island in present and future climate. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52(12): 2699–2714.
- INE (Instituto Nacional de Estadística). 2012. Censo de población y vivienda 2012. Obtenido de <http://censosbolivia.ine.gob.bo/webine/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. *Climate change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra.
- Gao, J. & B.C. O'Neill. 2020. Mapping global urban land for the 21st century with data-driven simulations and Shared Socioeconomic Pathways. *Nature Communications* 11(2302): <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15788-7>
- GADSC (Gobierno Autónomo Departamental Santa Cruz). 2011. Fisiografía y aptitud de uso del suelo en el departamento de Santa Cruz. Fase I, volumen II. Santa Cruz.
- Güneralp, B. & K.C. Seto. 2008. Environmental impacts of urban growth from an integrated dynamic perspective: A case study of Shenzhen, South China. *Global Environmental Change* 18(4): 720-735.
- Jin, M. & R.E. Dickinson. 2010. Land surface skin temperature climatology: Benefitting from the strengths of satellite observations. *Environmental Research Letters* 5(4): <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/5/4/044004>
- Kirshner, J.D. 2013. City profile: Santa Cruz de la Sierra. *Cities* 31: 544-552.
- Li, Z.L., B.H. Tang, H. Wu, H. Ren, G. Yan, Z. Wan, I.F. Trigo & J.A. Sobrino. 2013. Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment* 131: 14-37.
- Li, Y., M. Zhao, S. Motesharrei, Q. Mu, E. Kalnay & S. Li. 2015. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature Communications* 6: <https://doi.org/10.1038/ncomms7603>
- Maillard, O., R. Anívarro & M. Flores-Valencia. 2020. Pérdida de la cobertura natural (1986-2019) y proyecciones de escenarios a futuro (2050) en el Departamento de Santa Cruz. Informe técnico del Observatorio Bosque Seco Chiquitano, Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano, Santa Cruz.
- Maillard, O. 2020. Los bosques de Bolivia y sus funciones ambientales. *Hábitat* 90: 6-17.
- Manoli, G., S. Fatichi, M. Schlöpfer, K. Yu, T.W. Crowther, N. Meili, P. Burlando, G.G. Katul & E. Bou-Zeid. 2019. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature* 573: 55-60.
- Mannstein, H. 1987. Surface energy budget, surface temperature and thermal inertia. Pp. 391-410 En: Vaughan, R.A. & D. Reidel (eds) *Remote Sensing Applications in Meteorology and Climatology*, Springer, Dordrecht.
- Manzoni, M. 2005. Santa Cruz de la Sierra, una ciudad que busca su espacio. *Ciudades* 9: 135-160.
- Marengo, J.A., J. Tomasella, L.M. Alves, W. Soares & D. A. Rodriguez. 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letters* 38(1-5): [10.1029/2011GL047436](https://doi.org/10.1029/2011GL047436)
- Margulis, S. 2016. Vulnerabilidad y adaptación de las ciudades de América Latina al cambio climático. *Estudios del Cambio Climático en América Latina*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Santiago.
- McCarthy, M.P., M.J. Best & R.A. Betts. 2010. Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical Research Letters* 37(9): <https://doi.org/10.1029/2010GL042845>
- Mildrexler, D.J., M. Zhao, W.B. Cohen, S.W. Running, X.P. Song & M.O. Jones. 2018. Thermal Anomalies Detect Critical Global Land Surface Changes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 57(2): 391-411.
- Montaner-Fernández, D., L. Morales-Salinas, J.S. Rodríguez, L. Cárdenas-Jirón, A. Huete, G. Fuentes-Jaque, W. Pérez-Martínez & J. Cabezas. 2020. Spatio-temporal variation of the urban heat island in Santiago, Chile during summers 2005–2017 *Remote Sensing* 12(20): <https://doi.org/10.3390/rs12203345>
- Musco, F. 2016. Counteracting urban heat island effects in a global climate change scenario. *This Springer*, Nueva York.

- Nakicenovic, N., J. Alcanon, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grubler, T.Y. Jung, T. Kram et al. 2000. Special report on emissions scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University, Cambridge.
- Neinavaza, E., A.K. Skidmoreab & R. Darvishzadeh. 2020. Effects of prediction accuracy of the proportion of vegetation cover on land surface emissivity and temperature using the NDVI threshold method. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 85: 1-13.
- Oleson, K. 2012. Contrasts between urban and rural climate in CCSM4 CMIP5 climate change scenarios. *Journal of Climate* 25(5):1390-1412.
- O'Neill, B.C., E. Kriegler, K. Riahi, K.L. Ebi, S. Hallegatte, T.R. Carter, R Mathur & D.P. Vuuren. 2013. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climate Change* 122: 387–400.
- O'Neill, B.C., E. Kriegler, K.L Ebi, E. Kemp-Benedict, K. Riahi, D.S. Rothman, B.J., van Ruijven, D.P. van Vuuren, J. Birkmann, K. Kok et al. 2017. The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change* 42: 169–180.
- Pacheco, P. & B. Mertens. 2004. Land use change and agriculture development in Santa Cruz. *Bois et Forêt des Tropiques* 280: 29-40.
- Parastatidis, D., Z. Mitraka, N. Chrysoulakis & M. Abrams. 2017. Online global land surface temperature estimation from Landsat. *Remote Sensing* 9(12): <https://doi.org/10.3390/rs9121208>
- Parés-Ramos, I.K., N.L. Álvarez-Berrios & T.M. Aide. 2013. Mapping urbanization dynamics in major cities of Colombia, Ecuador, Perú, and Bolivia using night-time satellite imagery. *Land* 2(1): 37-59.
- Pokorný, J., J. Brom, J. Cermák & P. Hesslerová. 2010. Solar energy dissipation and temperature control by water and plants. *International Journal Water* 5: 311-336.
- Schwarz, N., S. Lautenbach & R. Seppelt. 2011. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures. *Remote Sensing of Environment* 115: 3175–3186.
- SERNAP (Servicio Nacional de Áreas Protegidas). 2013. Deforestación y regeneración de bosques en Bolivia y en sus áreas protegidas nacionales para los periodos 1990-2000 y 2000-2010. Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado y Conservación Internacional – Bolivia, La Paz.
- Seto, K.C., M. Fragkias, B. Güneralp & M.K. Reilly. 2011. A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion. *PLoS ONE* 6(8): e23777.
- Spickenbom, J. 2019. La isla de calor urbana de Santa Cruz de la Sierra en Bolivia y su relación con la cobertura vegetal. *Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado - El Patujú* 29: 12-15.
- UN-Habitat (United Nations Human Settlements Programme). 2008. State of the world's cities 2008/2009 harmonious cities. Nairobi.
- UN (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division). 2018. World urbanization prospects: The 2018 revision, methodology. Report No. ESA/P/WP.252, Nueva York.
- Wan, Z., S. Hook & Hulley, G. 2015. MYD11A1 MODIS/Aqua land surface temperature/emissivity daily L3 global 1km SIN Grid V006. NASA EOSDIS LP DAAC. Disponible en <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a1v006/>
- Wu, J. 2014. Urban ecology and sustainability: the state-of-the-science and future directions *Landscape Urban Plan* 125: 209–221.
- Yang, L., D. Niyogi, M. Tewari, D. Aliaga, F. Chen, F. Tian & G. Ni. 2016. Contrasting impacts of urban forms on the future thermal environment: example of Beijing metropolitan area. *Environmental Research Letters* 11: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034018>