

LA CAATINGA COMO LABORATORIO VIVO: CLIMA, RESILIENCIA Y CIUDADES INTELIGENTES

Lecciones de la Región Semiárida de Brasil para los Futuros Urbanos Globales

JAYURI SUSY FERNANDES DE ARAÚJO ¹, ANDRÉ AGRA GOMES DE LIRA ², MÔNICA TEJO CAVALCANTI ³

¹ FEDERAL UNIVERSITY OF CAMPINA GRANDE, BRAZIL

² COURT OF ACCOUNTS OF THE STATE OF PARAÍBA, BRAZIL

³ FEDERAL UNIVERSITY OF CAMPINA GRANDE, BRAZIL

PALABRAS CLAVE

Ciudades inteligentes
Bioma de la Caatinga
Planificación estratégica
Adaptación climática
Cuádruple hélice
Gobernanza urbana
Transiciones hacia la
sostenibilidad

RESUMEN

Este artículo reflexiona sobre los desafíos y oportunidades de construir ciudades inteligentes y sostenibles en regiones semiáridas, con un enfoque en el bioma Caatinga en Brasil. A partir de la Guía Estratégica para Ciudades Inteligentes y Sostenibles en el Semiárido, se enfatiza cómo las presiones climáticas y las vulnerabilidades socioambientales pueden transformarse en motores de resiliencia, innovación y gobernanza inclusiva. Utilizando la cuádruple hélice como marco de referencia, la Caatinga se presenta como un laboratorio vivo para probar y desarrollar estrategias urbanas. El artículo destaca sus potenciales contribuciones a los debates globales sobre adaptación climática, sostenibilidad urbana y el futuro de las ciudades inteligentes.

Recibido: 06 / 09 / 2025

Aceptado: 06 / 10 / 2025

1. La Caatinga como laboratorio viviente para ciudades inteligentes y sostenibles

Este artículo explora cómo las regiones semiáridas pueden promover ciudades inteligentes y sostenibles, con especial atención al bioma de la Caatinga en Brasil. Estos territorios se enfrentan a problemas críticos como sequías recurrentes, escasez de agua y desigualdad social, que se ven cada vez más agravados por el cambio climático. Al mismo tiempo, los contextos semiáridos ofrecen oportunidades para poner a prueba estrategias innovadoras de adaptación, energías renovables y gobernanza inclusiva. Al enmarcar la Caatinga como un laboratorio viviente, el artículo destaca cómo las presiones climáticas pueden transformarse en motores de resiliencia, innovación y transformación urbana sostenible.

El objetivo principal de este estudio es analizar cómo las regiones semiáridas, a menudo marginadas en los debates globales sobre ciudades inteligentes, pueden aportar lecciones innovadoras a la agenda internacional. Al conectar las prácticas locales con los marcos globales, el artículo busca identificar vías que integren la resiliencia, la planificación estratégica y la cuádruple hélice de la innovación como componentes centrales para un futuro sostenible.

1.1. Presiones climáticas y resiliencia

Las ciudades semiáridas son más vulnerables a los riesgos climáticos, pero también demuestran una gran capacidad de adaptación. Las sequías recurrentes, los ecosistemas vulnerables y las limitaciones de infraestructura requieren nuevas respuestas, desde la gestión comunitaria del agua hasta soluciones tecnológicas para la eficiencia de los recursos. Una ciudad en la Caatinga que desarrolla resiliencia es capaz de abordar los riesgos ambientales y transformar las limitaciones en nuevos caminos, promoviendo una gobernanza inclusiva y prácticas sostenibles que pueden inspirar a otras regiones del mundo.

2. Metodología y fuentes

Se llevó a cabo un análisis cualitativo y exploratorio de los marcos oficiales y los documentos estratégicos, haciendo hincapié en la Carta Brasileña para Ciudades Inteligentes (Brasil, 2021), la Guía Estratégica para Ciudades Inteligentes y Sostenibles en el Semiárido (INSA, 2024) y referencias globales (United Nations, 2015; 2016). Estas fuentes se adaptaron críticamente al contexto semiárido (vulnerabilidad climática, escasez de agua, interacciones urbano-rurales). Se adoptó la cuádruple hélice (gobierno, academia, industria, sociedad civil) como lente operativa para examinar la gobernanza colaborativa, la coproducción de conocimiento y la innovación alineada con la sostenibilidad. Este enfoque metodológico es cualitativo y exploratorio, lo que implica limitaciones en términos de validación empírica.

3. ¿Por qué ciudades inteligentes y sostenibles en regiones semiáridas?

Históricamente, la región semiárida de Brasil se ha caracterizado por persistentes desafíos ambientales, sociales y económicos, que se ven cada vez más agravados por el cambio climático y las presiones del desarrollo (Marengo et al., 2021). Las desigualdades, las sequías recurrentes y los paradigmas de desarrollo limitados inhiben el pleno progreso tanto de los territorios urbanos como de los rurales (Dos Santos y Pessoa, 2025; Sena et al., 2018).

Las ciudades inteligentes y sostenibles proporcionan un marco integrado para esta transformación. Las agendas internacionales, como la Agenda 2030 de las Naciones Unidas y la Nueva Agenda Urbana, hacen hincapié en que el desarrollo urbano debe alinear la innovación, la responsabilidad medioambiental y la inclusión social (United Nations, 2015, 2016). A nivel nacional, la *Carta Brasileña para Ciudades Inteligentes* define las ciudades inteligentes como aquellas comprometidas con la transformación urbana y digital sostenible, que operan de manera

inclusiva y en red, y que reducen las desigualdades al tiempo que promueven la resiliencia y mejoran la calidad de vida (Brasil, 2021).

Por lo tanto, el desarrollo de ciudades inteligentes y sostenibles en la región semiárida requiere la movilización de diversos actores, siguiendo el modelo de innovación de la cuádruple hélice. Este enfoque colaborativo no solo mejora la toma de decisiones, sino que también acelera la creación de soluciones específicas para cada contexto en materia de eficiencia de los recursos, transición a las energías renovables y gobernanza urbana sostenible.

3.1. Ciudades inteligentes y agendas globales

Las ciudades inteligentes y sostenibles no se limitan a las áreas metropolitanas, sino que abarcan municipios, pequeñas localidades e incluso comunidades rurales que se enfrentan a presiones crecientes derivadas del cambio climático, la urbanización y las transiciones económicas. En este sentido, el concepto de «ciudades del futuro» no solo se refiere a la innovación tecnológica, sino también al fortalecimiento de la justicia social, la viabilidad económica y la resiliencia medioambiental en diversos contextos (García Fernández y Peek, 2020; Valencia-Arias et al., 2025). En este sentido, Silva et al. (2024) destacan las limitadas respuestas institucionales y tecno-sociales en las ciudades sometidas a estrés climático. Concretamente, en los municipios semiáridos de Brasil, la gestión de la capacidad de adaptación sigue siendo débil, lo que pone de relieve la alta vulnerabilidad a los riesgos climáticos (Dos Santos y Pessoa, 2025).

Los marcos globales, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 (Naciones Unidas, 2015) y la Nueva Agenda Urbana (Naciones Unidas, 2016), refuerzan la importancia de los enfoques inclusivos y colaborativos para el desarrollo urbano. Estos marcos convergen en tres retos fundamentales, como garantizar la viabilidad económica, asegurar la justicia social y mantener la resiliencia medioambiental bajo una presión climática cada vez mayor. Para hacer frente a estos retos se requiere una planificación estratégica a largo plazo, innovación digital, gobernanza participativa y compromiso ciudadano.

3.2. La innovación de la cuádruple hélice

La innovación en las regiones semiáridas requiere la articulación de diversos actores capaces de abordar tanto los retos actuales como los riesgos futuros. Una base conceptual útil para ello es el modelo de innovación de la cuádruple hélice, propuesto originalmente por Carayannis y Campbell (2009), que enmarca la colaboración entre el gobierno, el mundo académico, la industria y la sociedad civil como la base de los ecosistemas de innovación. Este marco, aunque no se ha desarrollado específicamente para contextos semiáridos, ofrece una perspectiva transferible que puede orientar las estrategias para construir ciudades inteligentes y sostenibles bajo las presiones climáticas.

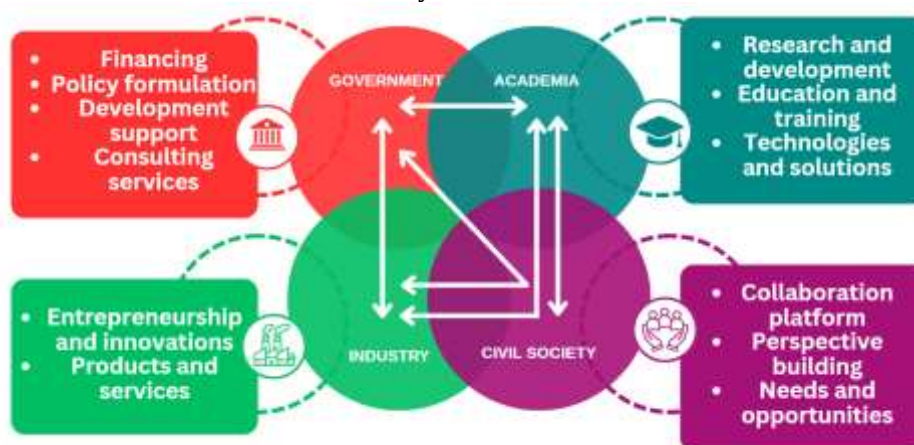
Estudios recientes destacan que la Cuádruple Hélice mejora la capacidad de las ciudades para integrar prácticas de innovación abierta, lo que permite flujos de conocimiento tanto internos como externos que fortalecen la gobernanza adaptativa (Marchesani y Ceci, 2025). También se reconoce cada vez más como un marco para la coproducción de la transformación urbana, alineando las tecnologías digitales y la innovación con la inclusión y la participación ciudadana (Paskaleva, 2021). Al incorporar la colaboración entre múltiples partes interesadas, el modelo permite las transiciones tecnológicas y el diseño de soluciones alineadas con el ámbito social y medioambiental, incluidas las estrategias basadas en la naturaleza (Olbertz et al., 2025).

En el debate más amplio sobre la sostenibilidad urbana, la cocreación de la cuádruple hélice se ha identificado como un mecanismo central para impulsar las agendas de las ciudades inteligentes y fortalecer las capacidades de resiliencia urbana (Stephens, 2025). Además, los estudios regionales demuestran cómo el modelo funciona como un sistema dinámico de intercambio de conocimientos que acelera el desarrollo sostenible más allá de las áreas metropolitanas, apoyando tanto la adaptación local como las vías de innovación a largo plazo (Hakeem et al., 2023). Las perspectivas complementarias de los estudios sobre innovación refuerzan la idea de que estos

ecosistemas son cruciales para promover la eficiencia de la innovación ecológica y construir agendas urbanas transformadoras (Evans et al., 2025; Guo et al., 2023).

En consonancia con compromisos internacionales como los ODS, la cuádruple hélice ofrece a las ciudades semiáridas una vía para ampliar la resiliencia, generar oportunidades sociales y económicas y construir sistemas urbanos que sean responsables con el medio ambiente y socialmente justos. La figura 1 ilustra esta perspectiva y muestra cómo la cuádruple hélice de la innovación conecta a diversos actores en la configuración de un futuro sostenible.

Figura 1. La cuádruple hélice de la innovación: interacciones entre el gobierno, el mundo académico, la industria y la sociedad civil.

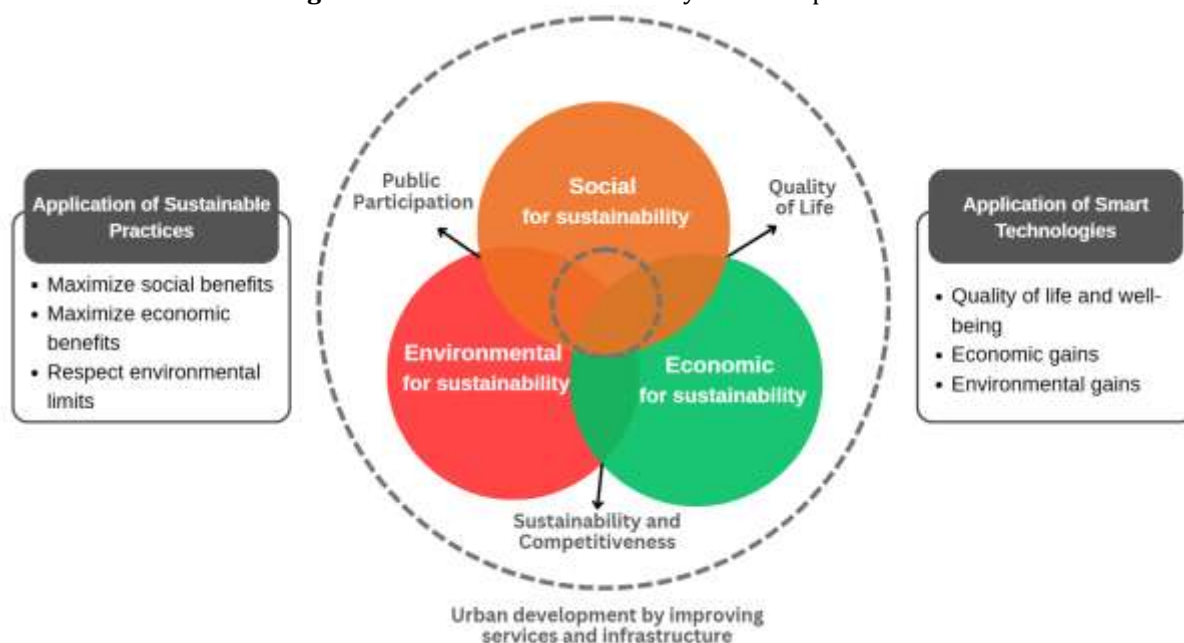


Fuente(s): Elaborado por los autores, adaptado del SGSAC (INSA, 2024).

La integración de la Cuádruple Hélice con las tres dimensiones fundamentales de la sostenibilidad (social, ambiental y económica) refuerza su naturaleza sistémica. Alinear las redes de innovación con prácticas sostenibles y tecnologías inteligentes permite a las ciudades maximizar la inclusión social, la competitividad económica y la responsabilidad medioambiental (van Bueren et al., 2025). Este enfoque se ve corroborado por estudios sobre redes de innovación ecológica, que muestran que las redes de innovación orientadas a la sostenibilidad equilibran los beneficios, la sociedad y el medio ambiente (Pattinson et al., 2023). La intersección de estos dominios evidencia que el desarrollo urbano debe ir más allá de las soluciones meramente tecnológicas, incorporando la gobernanza participativa y la resiliencia a largo plazo a la agenda urbana (Frantzeskaki et al., 2021).

La figura 2 ilustra esta perspectiva multidimensional, mostrando cómo la interacción entre los actores de la cuádruple hélice está intrínsecamente vinculada a los resultados de sostenibilidad.

Figura 2. Dimensiones sostenibles y la Cuádruple Hélice



Fuente(s): Elaborado por los autores, adaptado del SGSAC (INSA, 2024).

4. Motivaciones para la Guía Estratégica para Ciudades Inteligentes y Sostenibles (SGSAC 2030)

En esta sección se explica por qué la década actual representa un momento crítico para diseñar marcos estratégicos para las ciudades. Ante las presiones combinadas del crecimiento urbano, el cambio climático y la desigualdad, las ciudades deben ir más allá de las respuestas aisladas. Un enfoque estructurado y basado en datos empíricos puede ayudar a transformar estos retos en oportunidades para la resiliencia, la inclusión y la innovación sostenible.

La aceleración de la urbanización, las presiones climáticas y el aumento de las desigualdades sociales convergen para ejercer presión sobre los sistemas urbanos, especialmente en contextos de escasez de recursos. La rápida expansión urbana, junto con el cambio climático, puede sobrecargar las infraestructuras de agua, energía, movilidad, vivienda y salud (Das et al., 2024; Shah et al., 2025). Además, los estudios sobre resiliencia urbana hacen hincapié en que estos retos deben abordarse de forma multidimensional e integrada (Kapucu et al., 2024). Las presiones sobre los ecosistemas locales y los servicios medioambientales intensifican aún más las desigualdades urbanas, reduciendo la capacidad de adaptación de las ciudades (Atisa y Racelis, 2022).

En este contexto, es esencial pasar de proyectos aislados a una gobernanza integrada y con múltiples actores. Las ciudades que se basan en respuestas fragmentadas corren el riesgo de exacerbar las divisiones sociales y perder oportunidades de innovación sistémica. Una guía con visión de futuro y basada en datos empíricos puede ayudar a los municipios a alinear las estrategias locales con las agendas de sostenibilidad mundiales, como los ODS y la Nueva Agenda Urbana (Naciones Unidas, 2016).

Una guía estratégica tiene como objetivo proteger la calidad de vida, garantizar la competitividad y respetar los límites ecológicos hasta 2030. Al traducir los marcos globales en ámbitos aplicables a la práctica municipal, dicha guía permite a las ciudades anticipar riesgos, mejorar la resiliencia y fomentar el crecimiento inclusivo. Sus fundamentos se basan en los principios de coproducción de conocimientos, planificación a largo plazo y gobernanza colaborativa, que cada vez se reconocen más como requisitos previos para la transformación urbana sostenible (Evans et al., 2025; Frantzeskaki et al., 2021).

4.1. Por qué ahora: del desarrollo sostenible a la emergencia climática

Desde que el Informe Brundtland definió el desarrollo sostenible como «satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades» (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987), la urgencia de alinear el desarrollo urbano con la justicia intergeneracional no ha hecho más que aumentar. En la actual emergencia climática, las ciudades, especialmente en las economías emergentes, se enfrentan a riesgos cada vez mayores mientras siguen buscando el crecimiento y la inclusión (IPCC, 2023). Por lo tanto, una agenda urbana con visión de futuro no es opcional, sino que es la condición para salvaguardar el bienestar social, la competitividad económica y la integridad medioambiental hasta 2030 y más allá.

En conjunto, estas motivaciones ponen de relieve que la construcción de ciudades inteligentes y sostenibles no es solo un esfuerzo tecnológico, sino un proyecto social. El SGSAC tiene como objetivo proporcionar a los municipios herramientas prácticas y marcos de colaboración para navegar esta transformación hacia 2030.

4.2. Urbanización y presión sobre las infraestructuras

La rápida urbanización concentra la población, la demanda y la vulnerabilidad en las regiones metropolitanas. A medida que las ciudades se expanden, a menudo con un crecimiento vertical u horizontal no planificado, se intensifican las presiones sobre el suministro de agua, los sistemas energéticos, la vivienda, la movilidad, la salud y el saneamiento. Sin una planificación estratégica, este crecimiento amplifica la desigualdad, la degradación medioambiental y la presión fiscal (Seto et al., 2017; Naciones Unidas, 2019; Angel et al., 2021). Las estrategias de ciudades inteligentes y sostenibles ofrecen una respuesta integrada al combinar la planificación basada en datos con una gobernanza inclusiva.

4.3. La calidad del aire y el nexo de los recursos

El deterioro de la calidad del aire y las limitaciones en materia de agua, energía y alimentos forman un «nexo» crítico que amenaza la salud pública y la productividad económica. Las investigaciones sobre el nexo entre el agua, la energía y los alimentos hacen hincapié en que las políticas y tecnologías integradas suelen generar beneficios colaterales que superan sus costos, como un aire más limpio, un uso más eficiente de los recursos y una mayor resiliencia (Bleischwitz et al., 2018). Al posicionar a las ciudades como bancos de pruebas para estas soluciones, los municipios pueden acelerar la transición hacia las energías renovables, las prácticas de economía circular y la gestión sostenible del agua, reduciendo así las emisiones y reforzando la capacidad de adaptación.

4.4. De proyectos aislados a gobernanza sistémica

Los servicios municipales son la columna vertebral de la vida cotidiana, pero cuando las acciones siguen siendo fragmentadas, los resultados tienden a ser puntuales o incluso regresivos. Avanzar hacia una gobernanza sistémica, basada en procesos abiertos, con múltiples actores y basados en la evidencia, permite a los municipios planificar, financiar y prestar servicios más eficaces, al tiempo que se alinean las acciones locales con las agendas nacionales y mundiales, como los ODS (Ansell y Gash, 2008). Dentro de este enfoque, la Cuádruple Hélice de la Innovación proporciona la lógica operativa para la colaboración, reforzando la idea de que el desarrollo urbano inteligente y sostenible requiere marcos de gobernanza participativos, interconectados y adaptables (Meijer y Bolívar, 2016).

Investigaciones recientes destacan cómo las tecnologías digitales están remodelando los modelos de coproducción y gobernanza, creando tanto oportunidades como riesgos para la inclusión y la rendición de cuentas (Lember et al., 2019). La gobernanza urbana también debe abordar dinámicas estructurales como la expansión urbana, que influye en la movilidad social y económica (Smith y Blizard, 2021), y las implicaciones éticas de las tecnologías emergentes, como se observa en los debates sobre la vigilancia y la justicia racial (Johnson et al., 2022). En conjunto,

estos estudios subrayan que la gobernanza sistémica no solo tiene que ver con la eficiencia, sino también con la salvaguarda de la equidad, la confianza y la legitimidad democrática en las transiciones hacia ciudades inteligentes.

4.5. Principios para ciudades resilientes, inteligentes y sostenibles

Para pasar del concepto a la práctica, las ciudades deben adoptar principios rectores que se traduzcan en criterios de política y diseño. Basándose en marcos globales establecidos, análisis recientes hacen hincapié en que la resiliencia, la equidad y la sostenibilidad deben tratarse como prioridades transversales en el desarrollo urbano (OCDE, 2020; ONU-Hábitat, 2020; IPCC, 2023).

Principios para ciudades resilientes, inteligentes y sostenibles:

- Accesibilidad: acceso universal a servicios de calidad, vivienda, movilidad y conectividad digital.
- Disponibilidad de recursos naturales: gestión del agua, el suelo y la energía; eficiencia y diversificación.
- Compartir y bienes comunes: datos abiertos, infraestructura compartida y plataformas colaborativas que multiplican el valor público.
- Seguridad: seguridad pública, reducción del riesgo de desastres y ciberseguridad por diseño.
- Deseabilidad: calidad de vida, espacio público, cultura y participación ciudadana como resultados fundamentales.

Estos principios enmarcan la inversión, la regulación y la innovación para que el crecimiento sea compatible con la equidad y los límites ecológicos.

4.6. Alineación estratégica con los ODS

Las políticas de ciudades inteligentes y sostenibles apoyan directamente múltiples ODS, en particular el ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles), al tiempo que permiten avanzar en la reducción de la pobreza, la salud, la educación, el agua y el saneamiento, la energía limpia, la industria y la innovación, la acción climática y la biodiversidad. Enmarcar las iniciativas locales dentro de estos objetivos refuerza la rendición de cuentas y moviliza las alianzas y la financiación (ONU-Hábitat, 2020; OCDE, 2020; United Nations, 2015).

4.7. Ciudades socialmente justas e inteligentes (SJSC)

La búsqueda de ciudades socialmente justas e inteligentes (SJSC) requiere ir más allá de la visión tecnocrática de la «inteligencia» para cuestionar críticamente cómo la inclusión, la equidad y la participación ciudadana se integran en la transformación urbana. En la práctica, muchas agendas de ciudades inteligentes corren el riesgo de reforzar las desigualdades cuando la tecnología no va acompañada de modelos de gobernanza que prioricen la justicia social y la accesibilidad. Caragliu y Del Bo (2023), en su investigación sobre las ciudades inteligentes y la brecha digital urbana, demuestran que la «inteligencia» urbana puede exacerbar la brecha digital o reducirla activamente, dependiendo de cómo se diseñen las políticas para incluir a los grupos marginados. Esta dualidad pone de relieve la necesidad de una reflexión crítica sobre cómo se aplican las políticas de ciudades inteligentes en diversos contextos socioeconómicos.

Otros estudios recientes también han aclarado la dimensión de justicia de las ciudades inteligentes, subrayando que la innovación digital debe basarse en valores democráticos, derechos y equidad, y no solo en la eficiencia (Alizadeh y Sharifi, 2023a; Hacker y Neyer, 2023). El concepto de «ciudad inteligente social» subraya que la participación ciudadana debe ser sustantiva y basada en los derechos, de lo contrario, lo «inteligente» corre el riesgo de convertirse en una etiqueta retórica desconectada de las realidades vividas (Alizadeh y Sharifi, 2023b).

La Carta Brasileña para Ciudades Inteligentes articula la ambición de promover un desarrollo urbano inclusivo, sostenible y digitalmente transformador, haciendo hincapié en la equidad, la

resiliencia y el uso seguro de los datos (Brasil, 2021). Sin embargo, siguen existiendo dudas sobre cómo se traducen estos compromisos normativos en la práctica en las regiones semiáridas, donde se cruzan las desigualdades estructurales y las vulnerabilidades climáticas.

En estos territorios, la ciudadanía activa se ve a menudo desafiada por una infraestructura digital limitada, un acceso desigual a los servicios esenciales y vulnerabilidades socioambientales que ponen a prueba la premisa misma de las ciudades socialmente justas e inteligentes (Aditya et al., 2023; Dos Santos y Pessoa, 2025; Kolotouchkina et al., 2024). Esta tensión revela la importancia de las ciudades socialmente justas e inteligentes como marco de reflexión y como lente para cuestionar los modelos existentes. Al mismo tiempo, las ciudades socialmente justas y sostenibles no pueden existir sin ciudadanos activos. Por lo tanto, el reto central es cómo puede evolucionar la vida urbana para ser más sostenible y eficiente, al tiempo que se satisfacen las necesidades de las generaciones presentes y futuras.

La calidad de vida no es un resultado automático de las políticas de ciudades inteligentes, sino más bien la piedra angular que debe perseguirse de forma intencionada mediante el acceso universal a los servicios, una gobernanza inclusiva que valore la identidad cultural y oportunidades equitativas para la prosperidad a largo plazo (Jang y Gim, 2022; Kummitha, 2025). Maheshwari y Chopra (2025) también destacan los riesgos de adoptar modelos urbanos sin cuestionar sus implicaciones en materia de equidad, como ilustran los debates sobre la «ciudad de 15 minutos», en los que los parámetros de accesibilidad pueden ocultar cuestiones más profundas de justicia y desplazamiento.

Alinear la SJSC con los ODS, en particular los ODS 1, 2, 3, 4, 5, 10, 11 y 16, requiere que las ciudades pasen de visiones declarativas a políticas viables y responsables. Como sostienen Creutzig et al. (2024), esto exige enfoques basados en el lugar que integren la equidad social, la adaptación al clima y la gobernanza participativa. La tabla 1 resume cómo los ámbitos de la SJSC contribuyen al desarrollo urbano inclusivo, reflejando tanto las agendas internacionales como los retos específicos del contexto.

Tabla 1. Ámbitos para una ciudad socialmente justa e inteligente

Ámbito	Descripción
Convivencia y calidad de vida	Tiene como objetivo mejorar la calidad de vida mediante estrategias inclusivas para todos los grupos de edad. Se centra en la inclusión social y digital, la mejora de la atención sanitaria, la atención a las personas mayores, la seguridad alimentaria, la calidad de la vivienda y el desarrollo de edificios inteligentes que utilizan el Internet de las cosas, fomentando una región más eficiente y sostenible.
Capital humano social y	Busca transformar la interacción de los ciudadanos con los sectores público y privado promoviendo la inclusión social y digital a través de la educación, al tiempo que hace hincapié en el desarrollo de habilidades para estimular el crecimiento económico. Fomenta la participación ciudadana, la creatividad y la innovación, posicionando a la ciudad como un modelo de equidad y eficiencia.
Gobernanza integrada, inteligente y sostenible	Representa un sistema integral diseñado para optimizar la calidad de vida de los ciudadanos mediante la combinación de estrategias de salud, atención a las personas mayores, seguridad, vivienda e infraestructura inteligente. Da prioridad al desarrollo de habilidades y la educación, al tiempo que aprovecha el IoT y soluciones innovadoras para lograr ciudades más inclusivas y sostenibles.

Fuente(s): Elaborado por los autores, adaptado del SGSAC (INSA, 2024).

Estos ámbitos, adaptados del SGSAC (INSA, 2024), ilustran el enfoque multidimensional necesario para promover ciudades socialmente justas e inteligentes. Si bien abordan la calidad de vida, el capital social y la gobernanza integrada, su eficacia depende en última instancia de cómo las ciudades pongan en práctica estos principios en contextos marcados por la desigualdad y la

vulnerabilidad. Esto refuerza la necesidad de una reflexión crítica sobre la traducción de estos marcos a la práctica en las regiones semiáridas.

4.8. Ciudades económicamente viables e inteligentes (EVSC)

La dimensión económica es fundamental para promover ciudades inteligentes y sostenibles. Las ciudades inteligentes pueden actuar como ecosistemas que fomentan el espíritu empresarial a través de la infraestructura, la gobernanza y la innovación (Bukhari et al., 2024). Sin embargo, la configuración de los modelos económicos y las trayectorias empresariales divergen notablemente entre los municipios, dependiendo de sus contextos institucionales y regionales (Kummitha, 2019).

En las regiones semiáridas, donde prevalecen los retos climáticos, el estrés medioambiental y la escasez de recursos, garantizar la viabilidad económica requiere estrategias adaptadas que combinen la resiliencia con la innovación. La gestión de los recursos hídricos es fundamental tanto para el bienestar humano como para los sistemas productivos, mientras que la agricultura sostenible debe adaptarse a unas precipitaciones escasas y muy variables (Rathore, 2024).

La generación de energía renovable, en particular la solar y la eólica, desempeña un papel fundamental para permitir un crecimiento limpio en entornos áridos (Abdoos et al., 2025; Karimi et al., 2020). Sin embargo, el despliegue a gran escala de estas tecnologías también puede acarrear externalidades negativas, como el cambio en el uso del suelo, riesgos para la biodiversidad y el desplazamiento de comunidades vulnerables sin una compensación justa (Ávila, 2018; Sander et al., 2024; Wang et al., 2025).

Las inversiones clave incluyen infraestructuras para redes de comunicación, sistemas de transporte sostenibles, energías renovables y conectividad digital, junto con una sólida investigación y desarrollo que acelere las soluciones inteligentes (Sharifi et al., 2024). Las pruebas procedentes de los ecosistemas emprendedores también ponen de relieve el papel del acceso a Internet, el transporte, el capital humano y la gobernanza en la innovación urbana (Zhao et al., 2023).

La educación y la formación de la mano de obra siguen siendo fundamentales para desarrollar la capacidad de adaptación, mientras que la creación de empleo mejora la calidad de vida y ayuda a retener el talento (Virah-Sawmy y Sturmberg, 2025). Al mismo tiempo, los ecosistemas emprendedores y las asociaciones público-privadas pueden fomentar modelos económicos adaptables, especialmente cuando cuentan con el apoyo de la innovación institucional y la gobernanza inclusiva (Abdelaziz et al., 2024; Quan y Solheim, 2023).

En conjunto, estos elementos son esenciales para permitir el desarrollo regional, fortalecer la resiliencia ante las adversidades climáticas y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de las economías locales (Creutzig et al., 2024). Los principales ámbitos que caracterizan a las ciudades económicamente viables e inteligentes se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Ámbitos para una ciudad económicamente viable e inteligente.

Ámbito	Descripción
Modelo económico inteligente	Iniciativas que fortalecen las vocaciones locales, mejoran el entorno empresarial, atraen a nuevas empresas e inversores y promueven un crecimiento innovador y sostenible.
Infraestructura física y digital inteligente	Inversiones que garantizan el acceso a servicios esenciales (agua, energía, transporte) y fomentan la conectividad digital, la innovación y las economías basadas en el conocimiento.
Gobernanza integrada, inteligente y sostenible	Un modelo de gobernanza que conecta al gobierno, los ciudadanos, las empresas y la sociedad civil, replanteando la prestación de servicios a través de la transparencia, la eficiencia y la innovación.

Fuente(s): Elaborado por los autores, adaptado del SGSAC (INSA, 2024).

Al alinear sus esfuerzos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 8, 9, 11, 12, 16 y 17 de las Naciones Unidas, las ciudades inteligentes y económicamente viables apoyan el trabajo

decente y el crecimiento, las infraestructuras resilientes, el consumo y la producción sostenibles, la justicia y las instituciones sólidas, y las alianzas mundiales. En conjunto, estas inversiones no solo mejoran el bienestar actual, sino que también garantizan un futuro más equitativo, sostenible y próspero.

4.9. Ciudades inteligentes y sostenibles desde el punto de vista medioambiental (ESSC)

Las ciudades de las regiones semiáridas se enfrentan a retos críticos relacionados con el medio ambiente, la biodiversidad y la gestión sostenible de los recursos naturales. Para hacer frente a estas condiciones, deben equilibrar el crecimiento con la conservación, reduciendo la contaminación, gestionando los recursos de forma responsable y preservando la identidad local. Sin embargo, las pruebas demuestran que las políticas medioambientales en las ciudades inteligentes no son neutrales, ya que la transición a las energías renovables, por ejemplo, puede reproducir las desigualdades o desplazar a los grupos vulnerables si no se incorpora la justicia en la planificación (Levenda et al., 2021; Regier et al., 2025).

En la tabla 3 se resumen los ámbitos medioambientales clave para la sostenibilidad urbana futura, destacando la integración de la gestión de los recursos naturales, la movilidad sostenible y la gobernanza holística. En este sentido, la protección de los ecosistemas urbanos y rurales y la conservación de la biodiversidad son indispensables, ya que las infraestructuras verdes y las soluciones basadas en la naturaleza proporcionan beneficios multifuncionales para la resiliencia, el bienestar y la integridad ecológica (Kabisch et al., 2022; Paudel y States, 2023).

Tabla 3. Dominios para una ciudad sostenible y inteligente desde el punto de vista medioambiental.

Ámbito	Descripción
Entorno inteligente	Se refiere a las estrategias municipales para gestionar tanto el entorno construido como el natural, incorporando tecnologías innovadoras y normativas sostenibles. Se centra en la reducción de residuos, la gestión de la contaminación, la reducción de emisiones, la eficiencia hídrica, la transición energética y la planificación urbana resiliente.
Movilidad inteligente	Tiene como objetivo mejorar la eficiencia y la accesibilidad de los servicios de movilidad mediante sistemas multimodales integrados, logística sostenible y enfoques centrados en los ciudadanos. Promueve una movilidad de alta calidad que reduce el impacto medioambiental y garantiza la inclusión.
Gobernanza integrada, inteligente y sostenible	Representa un sistema holístico que equilibra el desarrollo inteligente con la sostenibilidad medioambiental. Implica la adopción de tecnologías y normativas para optimizar la gestión del agua, la energía y el medio ambiente, al tiempo que fomenta la resiliencia y la innovación.

Fuente(s): Elaborado por los autores, adaptado del SGSAC (INSA, 2024).

Al mismo tiempo, el avance de la movilidad sostenible requiere una planificación y una gobernanza integradas que vayan más allá de las soluciones tecnológicas para abordar los retos de accesibilidad y equidad (Cavoli et al., 2025). Garantizar el acceso al agua potable y al saneamiento refuerza aún más la salud pública y la calidad medioambiental, lo que hace que la conservación de los ecosistemas, la transición energética y un saneamiento adecuado sean fundamentales para lograr comunidades resilientes y equitativas.

Estos esfuerzos están directamente alineados con los ODS de las Naciones Unidas, en particular el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), el ODS 13 (Acción por el clima), el ODS 14 (Vida submarina) y el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres). Alinear las políticas locales con estos objetivos no solo aborda las presiones medioambientales, sino que también refuerza la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras.

5. Presente y futuro de las ciudades semiáridas

La región semiárida de Brasil representa una de las zonas áridas más pobladas del mundo, con 1477 municipios repartidos en once estados (IBGE, 2024; CONDEL/SUDENE, 2024). A pesar de su biodiversidad única y su riqueza sociocultural, la región sigue enfrentándose a retos persistentes, como la escasez de agua, la desertificación, la pobreza y el acceso desigual a las infraestructuras básicas (Alvalá et al., 2019). Estas vulnerabilidades convierten al contexto semiárido en un campo de pruebas fundamental para las estrategias de ciudades inteligentes y sostenibles.

Basándose en el SGSAC, esta sección presenta un diagnóstico integrado de las condiciones actuales y explora los posibles futuros económicos, sociales y medioambientales que pueden desarrollarse en función de las decisiones políticas, los modelos de gobernanza y la acción colectiva. El análisis subraya tanto las limitaciones estructurales como las oportunidades emergentes, en particular el potencial para aprovechar las energías renovables, fortalecer el capital humano y promover una gobernanza inclusiva.

Al sistematizar estas perspectivas, el bioma de la Caatinga se enmarca como urgente, dada su exposición a los riesgos climáticos y las desigualdades estructurales, y prometedor, como laboratorio viviente para la adaptación, la innovación y la resiliencia. Los talleres realizados durante la preparación de la Guía, en los que participaron diversas partes interesadas, dieron lugar a tres escenarios: referencia, optimista, pesimista e implicaciones. Estos escenarios sintetizan cómo los actores locales perciben las trayectorias en sus municipios. Las subsecciones siguientes resumen estas trayectorias en tres dimensiones: viabilidad económica, inclusión social y sostenibilidad medioambiental.

5.1. Escenarios económicos: viabilidad, productividad e innovación

- Escenario base: Las economías locales siguen ancladas en la producción primaria (cadenas animales y vegetales), con una adopción tecnológica incremental limitada a unas pocas cadenas de valor y territorios. La escasez de agua se mitiga parcialmente mediante fuentes alternativas y medidas de eficiencia, lo que permite la continuidad de las actividades existentes, pero restringe la diversificación y el valor añadido. Persiste la informalidad, mientras que la migración del campo a la ciudad sigue remodelando los mercados laborales, ejerciendo presión sobre los servicios urbanos sin traducirse en ganancias de productividad.
- Optimista: Las inversiones estratégicas en seguridad hídrica (recogida de agua de lluvia, reducción de pérdidas, reutilización), restauración del suelo y energías renovables (energía solar y generación distribuida) reducen los riesgos de producción y atraen capital privado. Las políticas de agrupación y los acuerdos de cooperación fortalecen las cadenas locales, fomentando la transición de los productos básicos a productos de mayor valor añadido. Las políticas de capital humano, como la formación técnica y profesional adaptada a las vocaciones regionales, aumentan la empleabilidad y retienen a los jóvenes cualificados. El resultado es un modelo económico inteligente (cuadro 2) que integra la digitalización, la logística y las finanzas con prácticas circulares (eficiencia energética e hídrica), lo que mejora la competitividad y los ingresos municipales.
- Pesimista: El aumento del estrés hidrológico, la débil gobernanza de los recursos y la limitada difusión de la innovación provocan la discontinuidad de las actividades empresariales en la agricultura y los servicios relacionados. La pérdida de biodiversidad y la degradación de la tierra amplían la producción a zonas frágiles, mientras que la emigración de mano de obra cualificada reduce la productividad y el espíritu empresarial. Las cadenas desarticuladas y las restricciones crediticias aumentan los costos de transacción, lo que encadena a los municipios a vías de bajo valor y alta vulnerabilidad y aumenta la carga sobre los sistemas de protección social.
- Implicaciones: La resiliencia económica depende de la alineación de tres pilares: (i) infraestructura para la fiabilidad (agua, energía, logística), (ii) competencias y densidad

institucional (cooperativas, servicios de extensión, datos e inteligencia de mercado), y (iii) innovación y financiación (I+D, financiación combinada, APP). Estas conclusiones ponen en práctica la agenda del EVSC presentada en la sección 4.8.

5.2. Escenarios sociales: inclusión, capacidades y calidad de vida

- Situación inicial: Los programas mejoran la seguridad alimentaria y nutricional de manera desigual. La expansión educativa avanza, pero las deficiencias en infraestructura y la retención de docentes en zonas remotas siguen siendo obstáculos importantes. La participación de la comunidad respalda la implementación de los proyectos en curso; sin embargo, persisten las disparidades en el acceso a los servicios y la conectividad digital, lo que mantiene una desigualdad moderada.
- Optimista: Las políticas integradas garantizan los servicios básicos universales (agua, saneamiento, salud primaria) y amplían las oportunidades de aprendizaje permanente en consonancia con las economías locales. La valorización de la cultura local y el fortalecimiento de las organizaciones comunitarias mejoran la adhesión y los resultados. El apoyo específico a las empresas asociativas y cooperativas descentraliza el acceso a los recursos y aumenta los ingresos de los hogares, lo que contribuye a reducir la desigualdad. El resultado se ajusta a la agenda del SJSC (sección 4.7), lo que se refleja en la mejora de los indicadores de desarrollo humano, una mayor participación ciudadana y unos espacios públicos más seguros y dinámicos.
- Pesimista: Las barreras al acceso a la tierra, la discontinuidad de los programas sociales y la industrialización ciega al medio ambiente exacerban la inseguridad alimentaria y el abandono escolar, lo que agrava la exclusión. El acceso digital limitado y los ecosistemas empresariales débiles confinan a los trabajadores a empleos de bajo valor. La precariedad urbana se intensifica debido a la insuficiencia de viviendas y la falta de seguridad pública, lo que aumenta la vulnerabilidad y fomenta la emigración.
- Implicaciones: La resiliencia social depende de tres pilares interconectados: la formación de capacidades (educación e inclusión digital), la universalidad de los servicios (salud, agua, saneamiento) y la continuidad institucional (programas estables con financiación plurianual). El aprovechamiento de la cuádruple hélice fomenta soluciones coproducidas, como la tecnología educativa para el aprendizaje a distancia, la telemedicina para poblaciones dispersas y la tecnología cívica para la elaboración de presupuestos participativos, en consonancia con los ámbitos del cuadro 1.

5.3. Escenarios medioambientales: ecosistemas, agua y transiciones energéticas

- Situación de referencia: los municipios adoptan medidas selectivas para el control de la contaminación, la conservación básica y una agricultura climáticamente inteligente limitada. Sin embargo, la gobernanza fragmentada y la débil aplicación de la ley limitan los resultados a escala paisajística. El acceso al agua potable mejora en determinadas zonas, pero persisten las pérdidas y la contaminación. Las transiciones energéticas solo avanzan en nichos específicos.
- Optimista: Se amplía el enfoque sistémico de la gestión de la tierra y el agua. La reforestación y la restauración ecológica frenan la desertificación, mientras que la gobernanza integrada de las cuencas hidrográficas reduce la escasez y mejora la resiliencia. Las soluciones basadas en la naturaleza aportan beneficios multifuncionales para la adaptación. El saneamiento universal y el acceso al agua potable refuerzan la salud pública. El rápido despliegue de medidas de energía limpia y eficiencia (edificios, alumbrado público, riego) reduce las emisiones y los costes operativos. Las transiciones de movilidad hacia sistemas multimodales y centrados en los ciudadanos reducen la contaminación y amplían la accesibilidad. Este escenario refleja la agenda del ESSC (sección 4.9) y promueve los ODS 6, 7, 13, 14 y 15.

- Pesimista: La presión demográfica cerca de los ríos sin gestión de la pérdida de agua, las quemadas incontroladas y la mala gestión del suelo aceleran la degradación medioambiental. La débil aplicación de la ley en las zonas protegidas, la discontinuidad de los programas y la fragmentación institucional afianzan la «industria de la sequía», intensificando los conflictos por el agua. Los riesgos climáticos empeoran debido a las sequías prolongadas y el calor extremo, con efectos en cadena sobre la salud, la productividad y la seguridad.
- Implicaciones: La resiliencia medioambiental requiere tres elementos fundamentales: integración de la gobernanza (funciones claras, supervisión y aplicación de la ley), inversión en agua y saneamiento como política de salud y productividad, y transiciones hacia la energía limpia y la movilidad que generen beneficios colaterales locales, como puestos de trabajo y ahorros operativos. La planificación municipal debe incorporar métricas de riesgo y adaptación y emplear datos abiertos como herramienta para orientar las decisiones, en consonancia con los ámbitos de la tabla 3.

6. Vías estratégicas hacia 2030

De cara al futuro, el bioma semiárido de la Caatinga brasileña es un espacio que presenta vulnerabilidades urgentes y un potencial transformador. Las megatendencias mundiales, como el crecimiento demográfico, la aceleración del cambio climático, las tecnologías disruptivas y los valores generacionales cambiantes, se entrecruzan con los retos locales, lo que exige replantearse el futuro urbano y rural. En este contexto, el SGSAC (INSA, 2024) esboza vías prospectivas para orientar a los municipios hacia 2030 en consonancia con las agendas internacionales.

Más que soluciones prescriptivas, estas vías surgen de una prospectiva exploratoria que identifica señales débiles, patrones actuales y tendencias transformadoras que, si se aprovechan adecuadamente, pueden abrir trayectorias resilientes e inclusivas para las ciudades semiáridas. Hacen hincapié en que el futuro no está predeterminado, sino que depende de las decisiones de gobernanza, la coherencia de las políticas y la capacidad de integrar las innovaciones tecnológicas, sociales y medioambientales en modelos sensibles al contexto.

Para 2030, las ciudades semiáridas pueden evolucionar hasta convertirse en:

- Económicamente viables e innovadoras, con economías circulares, vocaciones productivas locales y el espíritu empresarial como motores de la prosperidad.
- Socialmente justas e inclusivas, donde la salud, la educación, la vivienda y la alfabetización digital sean universalmente accesibles, con el apoyo de una gobernanza participativa y transparente.
- Medioambientalmente sostenibles y resilientes, mediante una gestión eficaz de los recursos, la adopción de energías renovables y estrategias de adaptación y mitigación de los riesgos climáticos.

Estas visiones estratégicas se apoyan en tres pilares: (i) modelos de gobernanza transparentes, participativos y adaptables; (ii) inversiones en infraestructura, digitalización y capital humano; y (iii) políticas que prioricen la equidad, la innovación y la gestión medioambiental.

Sin embargo, para alcanzar estos futuros es necesario superar obstáculos críticos como la discontinuidad política, la insuficiente inversión en educación y tecnología, la débil capacidad institucional y las persistentes desigualdades en el acceso a los servicios. La Guía consolida estos obstáculos en las dimensiones económica, social y medioambiental (cuadros 4-6), haciendo hincapié en que, sin respuestas sistémicas, las zonas semiáridas pueden seguir atrapadas en ciclos de vulnerabilidad.

Tabla 4. Obstacles and Risks for the Social Dimension.

Modelo económico más inteligente	Gobernanza más inteligente	Infraestructura física y digital inteligente
La falta de voluntad política puede dar lugar a políticas inadecuadas para el desarrollo sostenible en las regiones semiáridas.	La concentración de poder obstaculiza la participación democrática.	La falta de integración socava la eficiencia.
La baja inversión en educación reduce la capacidad de la población para adquirir habilidades que impulsen modelos económicos inteligentes.	La falta de conocimiento sobre cuestiones clave socava las soluciones eficaces.	La elección inadecuada de tecnologías desperdicia las inversiones.
La escasa disponibilidad de agua es un obstáculo importante en la región semiárida	La resistencia al cambio puede obstaculizar la innovación política.	El apoyo estatal insuficiente retrasa el desarrollo.
Los altos costes energéticos pueden limitar el crecimiento.	La discontinuidad institucional durante las transiciones políticas socava las políticas y los proyectos.	El uso indebido de los recursos públicos conduce al despilfarro financiero.
La débil infraestructura de Internet limita el acceso a la información y la innovación	La falta de recursos dificulta el desarrollo sostenible	La complejidad técnica y financiera sobrecarga los proyectos de infraestructura.
La falta de adaptación a las mejores prácticas productivas genera ineficiencias y estancamiento económico.	La mala calidad de los datos dificulta la planificación.	La pérdida de datos de los ciudadanos amenaza la privacidad y la seguridad.
La baja productividad socava la competitividad.	La pérdida de identidad local debilita la comunidad, el turismo y la cultura.	Las infraestructuras no están adaptadas a las necesidades climáticas futuras.
La emigración regional provoca una pérdida de talento.		

Fuente(s): Elaborado por los autores, adaptado del SGSAC (INSA, 2024).

Tabla 5. Obstacles and Risks for the Social Dimension.

Capital humano más inteligente	Gobernanza más inteligente	Infraestructura física y digital inteligente
La falta de acceso a la educación más allá de la escolarización formal limita el desarrollo de las habilidades para el mercado laboral.	La falta de transparencia socava la confianza en las instituciones gubernamentales.	La vulnerabilidad económica y los ingresos limitados provocan un alto nivel de desempleo.
Las barreras lingüísticas excluyen a los grupos minoritarios y a los inmigrantes de las oportunidades educativas.	Las políticas públicas ineficaces no satisfacen las necesidades de la población.	El crecimiento urbano descontrolado perjudica la calidad del aire y la salud.
Los prejuicios y el estigma social obstaculizan el pleno desarrollo de las personas.	Desigualdad en el acceso a servicios públicos de calidad.	Acceso desigual a alimentos saludables debido a la distribución desigual.
Acceso desigual a los servicios de salud mental y apoyo emocional.	Falta de mecanismos de rendición de cuentas para los líderes gubernamentales.	Falta de espacios verdes y recreativos en las zonas urbanas y rurales.
La escasez de oportunidades de aprendizaje permanente limita el desarrollo de competencias.	Resistencia a adoptar tecnologías de administración electrónica que podrían mejorar la eficiencia y la transparencia en la prestación de servicios públicos.	La exclusión digital limita el acceso a servicios esenciales en línea.

Fuente(s): Elaborado por los autores, adaptado del SGSAC (INSA, 2024).

Tabla 6. Obstacles and Risks for the Social Dimension.

Entorno más inteligente	Movilidad más inteligente	Gobernanza más inteligente
Ausencia de preocupaciones medioambientales en el municipio o falta de una agencia específica en la zona, junto con acciones insuficientes de educación medioambiental.	Ausencia de una agencia municipal dedicada a la movilidad, lo que se traduce en una falta de enfoque y coordinación en la gestión de este aspecto vital.	Los líderes políticos mantienen prácticas clientelistas y coercitivas, lo que socava la eficacia de las acciones medioambientales.
Escasa educación de la población en materia medioambiental.	Desconexión entre las políticas de movilidad y las necesidades reales de la población, lo que da lugar a soluciones inadecuadas.	Dependencia continua de la población respecto a los políticos, lo que debilita la independencia en la toma de decisiones medioambientales.
Persistencia de la degradación medioambiental y sus consecuencias en el municipio.	Falta de planificación urbana que conduce al aislamiento de las zonas rurales y agrícolas.	Resistencia al cambio, como resultado de la falta de formación y concienciación sobre cuestiones medioambientales.
Un modelo económico que no da prioridad a la conservación de los recursos naturales.	Falta de concienciación pública sobre la importancia de la accesibilidad y la movilidad sostenible.	Dificultades de gobernanza en la implementación de nuevos sistemas y procesos, lo que provoca retrasos en la gestión medioambiental.

Mala gestión de los recursos naturales.	Falta de medidas para facilitar el acceso de los ciudadanos a las infraestructuras.	Falta de interés por parte de la gestión pública en la implementación de un modelo de ciudad inteligente, lo que dificulta el avance de prácticas sostenibles.
Bajo nivel educativo y falta de responsabilidad con respecto a las cuestiones contemporáneas y su impacto medioambiental.	Problemas de accesibilidad, como aceras inadecuadas y falta de una urbanización adecuada, así como la preferencia por el transporte motorizado individual.	Falta de continuidad en los proyectos medioambientales, lo que interrumpe las acciones en curso.
Falta de compromiso del gobierno con la preservación y la gestión del medio ambiente.	Escasez o exceso de equipos de movilidad, que pueden causar daños si no son utilizados adecuadamente por la población.	Escasez de recursos financieros, lo que limita la implementación de servicios medioambientales.

Fuente(s): Elaborado por los autores, adaptado del SGSAC (INSA, 2024).

En última instancia, las vías hacia 2030 reafirman que las ciudades semiáridas pueden actuar como laboratorios de resiliencia e innovación, donde las agendas globales se traducen en soluciones con base local. Al vincular la previsión estratégica con la gobernanza inclusiva, estos municipios tienen el potencial de hacer frente a la adversidad y generar modelos que inspiren a otras regiones que se enfrentan a retos climáticos y estructurales similares.

6.1. Facilitadores tecnológicos para ciudades inteligentes semiáridas

La transformación de las ciudades semiáridas depende cada vez más de facilitadores tecnológicos que integren la sostenibilidad y la innovación. Las soluciones digitales, como el Internet de las cosas (IoT), apoyan la vigilancia del medio ambiente, optimizan el uso del agua y la energía y refuerzan la preparación para casos de desastre. Los sistemas de energía renovable y el almacenamiento de energía reducen las emisiones y aumentan la resiliencia, mientras que las plataformas digitales amplían los mercados locales y fomentan el espíritu empresarial. La cadena de bloques mejora la transparencia en la gestión pública y la inteligencia artificial (IA) mejora la eficiencia de las infraestructuras y la prestación de servicios.

Las herramientas de IA también pueden respaldar modelos predictivos para la gestión de sequías, optimizar la distribución de energía en redes inteligentes y mejorar la toma de decisiones en la gobernanza urbana mediante el análisis de datos socioambientales a gran escala. En contextos semiáridos, la combinación de IA, IoT y teledetección mejora la capacidad de adaptación, permitiendo la supervisión de los recursos hídricos, la predicción de la productividad agrícola en condiciones de precipitaciones irregulares y la detección temprana de los riesgos relacionados con la sequía (Kamilaris y Prenafeta-Boldú, 2018). Las pruebas de estudios globales muestran además que la integración de la IA en los sistemas de energía renovable y las redes inteligentes mejora la estabilidad, la eficiencia y la resiliencia, factores clave para las regiones expuestas al estrés climático (Wang et al., 2025).

Cuando se alinean con las prácticas de economía circular, el conocimiento local y la participación ciudadana a través de plataformas digitales participativas, estos facilitadores ofrecen vías prácticas para acelerar la transición hacia ciudades más inclusivas, resilientes y sostenibles en la región semiárida.

7. Conclusión

Este artículo examinó la Caatinga como un laboratorio viviente para ciudades inteligentes y sostenibles, mostrando cómo las presiones climáticas, las vulnerabilidades socioambientales y las desigualdades estructurales pueden convertirse en motores de resiliencia, innovación y gobernanza inclusiva. Basándose en el SGSAC, el análisis posicionó a la región no como periférica, sino como un escenario pionero donde se pueden probar, adaptar y ampliar las estrategias urbanas.

Los escenarios esbozados describen tanto los riesgos como las oportunidades. Si bien las trayectorias pesimistas revelan la persistencia de barreras estructurales, las trayectorias de referencia y optimistas demuestran que la gobernanza estratégica, las inversiones en infraestructura y capital humano, y la alineación con las agendas globales pueden abrir el camino a un futuro transformador. La integración de la cuádruple hélice y los facilitadores tecnológicos, como el IoT, las energías renovables, las plataformas digitales y la inteligencia artificial, muestra que la resiliencia va más allá de la adaptación a sistemas proactivos, innovadores e inclusivos.

Desde el punto de vista de las políticas, destacan tres prioridades: (i) fortalecer los mecanismos de gobernanza transparentes y a largo plazo, (ii) garantizar inversiones en infraestructura y capital humano adecuadas a los contextos semiáridos, y (iii) promover la innovación orientada a la equidad que reduzca las desigualdades y fomente la resiliencia. Estos principios refuerzan la necesidad de políticas estables a lo largo de los ciclos políticos, capaces de movilizar asociaciones público-privadas e integrar la justicia social con los límites ecológicos.

En última instancia, la Caatinga demuestra que las ciudades semiáridas pueden servir de ejemplo mundial de cómo conciliar los límites ecológicos, la justicia social y la viabilidad económica. Para 2030, si se aplican de manera eficaz vías colaborativas, innovadoras y con visión de futuro, la región semiárida no solo podrá superar sus retos históricos, sino también inspirar futuros sostenibles mucho más allá de sus fronteras.

8. Agradecimientos

El presente artículo se ha elaborado en el marco del SGSAC (INSA, 2024), con contribuciones del Centro de Bioeconomía, Biotecnología e Innovación en la Caatinga (CEBBI Caatinga), la Universidad Federal de Campina Grande (UFCG) y el Tribunal de Cuentas del Estado de Paraíba (Brasil). Los autores agradecen el apoyo de las instituciones asociadas y las valiosas aportaciones de las partes interesadas que participaron en los talleres y consultas que sirvieron de base para las visiones y escenarios presentados en este trabajo.

Referencias

- Abdelaziz, A., El-Aziz, A., & Salem, M. (2024). The role of public-private partnerships (PPPs) in sustainable smart city management in Egypt. *Journal of Civil and Environmental Studies*, 13(2), 150–164. <https://doi.org/10.21608/jces.2024.361680>
- Abdoos, M., Noorollahi, Y., Shahee, A., Yousefi, H., Rezaeifard, M., & Moltames, R. (2025). Energy PLAN-based evaluation of renewable energy scenarios in semi-arid contexts. *Results in Engineering*, 27, 107007. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107007>
- Aditya, T., Ningrum, S., Nurasa, H., & Irawati, I. (2023). Community needs for the digital divide on the smart city policy. *Heliyon*, 9(8), e18932. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18932>
- Alizadeh, H., & Sharifi, A. (2023a). Societal smart city: Definition and principles for post-pandemic urban policy and practice. *Cities*, 134, 104207. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104207>
- Alizadeh, H., & Sharifi, A. (2023b). Toward a societal smart city: Clarifying the social justice dimension of smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 95, 104612. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104612>
- Alvalá, R. C. S., Cunha, A. P. M. A., Brito, S. S. B., Seluchi, M. E., Marengo, J. A., Moraes, O. L. L., & Carvalho, M. A. (2019). Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 91(1), e20170209. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170209>
- Andréasson Derner, T., & Altrov Berg, G. (2022). *Voluntary local review handbook: Bridging global goals and local reality*. Global Utmaning. https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/voluntarylocalreview-abridgebetweenglobalgoalsandlocalreality_2022_en_1.pdf
- Angel, S., Lamson-Hall, P., Blei, A., Shingade, S., & Kumar, S. (2021). Densify and expand: A global analysis of recent urban growth. *Sustainability*, 13(7), 3835. <https://doi.org/10.3390/su13073835>
- Ansell, C., & Gash, A. (2008). Collaborative governance in theory and practice. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 18(4), 543–571. <https://doi.org/10.1093/jopart/mum032>
- Atisa, G., & Racelis, A. E. (2022). Analysis of urbanization and climate change effects on community resilience in the Rio Grande Valley, South Texas. *Sustainability*, 14(15), 9049. <https://doi.org/10.3390/su14159049>
- Avila, S. (2018). Environmental justice and the expanding geography of wind power conflicts. *Sustainability Science*, 13(3), 599–616. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0547-4>
- Bleischwitz, R., Spataru, C., VanDeveer, S. D., Obersteiner, M., van der Voet, E., Johnson, C., Andrews-Speed, P., Boersma, T., Hoff, H., & van Vuuren, D. P. (2018). Resource nexus perspectives towards the United Nations Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, 1(12), 737–743. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0173-2>
- Brazil. (2021). *Brazilian Charter for Smart Cities*. Ministry of Regional Development. <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/desenvolvimento-urbano-e-metropolitano/projeto-andus/carta-brasileira-para-cidades-inteligentes/CartaBrasileiraparaCidadesInteligentes2.pdf>
- Brundtland, G. H. (1987). *Our common future: Report of the World Commission on Environment and Development*. Oxford University Press.
- Bukhari, A., Alghamdi, A., Asad, M., & Khan, M. (2024). Smart city as an ecosystem to foster entrepreneurship. *Sustainability*, 16(24), 11209. <https://doi.org/10.3390/su162411209>
- Caragliu, A., & Del Bo, C. F. (2023). Smart cities and the urban digital divide. *npj Urban Sustainability*, 3, 43. <https://doi.org/10.1038/s42949-023-00117-w>
- Carayannis, E. G., & Campbell, D. F. J. (2009). “Mode 3” and “Quadruple Helix”: Toward a 21st century fractal innovation ecosystem. *International Journal of Technology Management*, 46(3–4), 201–234. <https://doi.org/10.1504/IJTM.2009.023374>
- Cavoli, C., Oviedo, D., Levy, C., Chong, A. Z. W., Macarthy, J. M., Koroma, B., Romero de Tejada, J., Machanguana, C. A., Yusuf, Y., & Jones, P. (2025). Leapfrogging towards sustainable mobility:

- Policy challenges and opportunities for Sub-Saharan African cities. *Transport Policy*, 171, 513–530. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2025.06.011>
- CONDEL/SUDENE. (2024, January 3rd). *Resolução nº 176, de 3 de janeiro de 2024*. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. <https://www.gov.br/sudene/pt-br/acesso-a-informacao/legislacao/hierarquia/resolucoes-conselho-deliberativo/resolucao-condel-sudene-no-176-de-3-de-janeiro-de-2024>
- Creutzig, F., Becker, S., Berrill, P., Bongs, C., Bussler, A., Cave, B., Constantino, S., M., Grant, M., Heeren, N., Heinen, E., Hintz, M., J., Ingen-Housz, T., Johnson, E., Kolleck, N., Liotta, C., Lorek, S., Mattioli, G., Niamir, L., McPheason, T., Milojevic-Dupont, N(2024). Towards a public policy of cities and human settlements in the 21st century. *npj Urban Sustainability*, 4, 29. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00168-7>
- Das, S., Choudhury, M. R., Chatterjee, B., Das, P., Bagri, S., Paul, D., Bera, M., & Dutta, S. (2024). Unraveling the urban climate crisis: Exploring the nexus of urbanization, climate change, and their impacts on the environment and human well-being—A global perspective. *AIMS Public Health*, 11(3), 963–1001. <https://doi.org/10.3934/publichealth.2024050>
- Dos Santos, Y. C., & Pessoa, Z. S. (2025). Adaptive capacity management in municipalities in the semiarid region of Brazil: Application of a composite index. *Climate Risk Management*, 48, 100696. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2025.100696>
- Evans, J. P., Karvonen, A., Raven, R., & Bulkeley, H. (2025). Grand challenges in sustainable cities: Urban innovation as a priority. *Frontiers in Sustainable Cities*, 7, 1543273. <https://doi.org/10.3389/frsc.2025.1543273>
- Frantzeskaki, N., McPhearson, T., & Kabisch, N. (2021). Urban sustainability science: Prospects for innovations through a system's perspective, relational and transformations' approaches. *Ambio*, 50(9), 1650–1658. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01521-1>
- García Fernández, C., & Peek, D. (2020). Smart and Sustainable? Positioning Adaptation to Climate Change in the European Smart City. *Smart Cities*, 3(2), 511–526. <https://doi.org/10.3390/smartcities3020027>
- Guo, J., Fu, Y., & Sun, X. (2023). Green innovation efficiency and multiple paths of urban sustainable development in China: Multi-configuration analysis based on urban innovation ecosystem. *Scientific Reports*, 13, 14613. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41736-8>
- Hacker, P., & Neyer, J. (2023). Substantively smart cities – Participation, fundamental rights and temporality. *Internet Policy Review*, 12(1). <https://doi.org/10.14763/2023.1.1696>
- Hakeem, M. M., Goi, H. C., Frendy, & Ito, H. (2023). Regional sustainable development using a Quadruple Helix approach in Japan. *Regional Studies, Regional Science*, 10(1), 119–138. <https://doi.org/10.1080/21681376.2023.2171313>
- IBGE. (2024). *Semiárido brasileiro*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15974-semiarido-brasileiro.html>
- Instituto Nacional do Semiárido (INSA). (2024). *Strategic Guide for Smart and Sustainable Cities in the Semi-arid: Shaping the Cities of the Future in 2030*. Campina Grande, PB: INSA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee & J. Romero (eds.)]. IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jang, S., & Gim, T. H. T. (2022). Considerations for encouraging citizen participation by information-disadvantaged groups in smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103437. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103437>
- Johnson, T. L., Johnson, N. N., McCurdy, D., & Olajide, M. S. (2022). Facial recognition systems in policing and racial disparities in arrests. *Government Information Quarterly*, 39(4), 101753. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2022.101753>
- Kabisch, N., Frantzeskaki, N., & Hansen, R. (2022). Principles for urban nature-based solutions. *Ambio*, 51(6), 1388–1401. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01685-w>

- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- Kapucu, N., Ge, Y., Rott, E., & Isgandar, H. (2024). Urban resilience: Multidimensional perspectives, challenges and prospects for future research. *Urban Governance*, 4(3), 162–179. <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2024.09.003>
- Karimi, D., Ghorbani, B. and Momen, M. (2020). Net zero energy buildings in semi-arid climates: An analysis on 3 case studies in Tehran, Iran. *Energy Equipment and Systems*, 8(2), 169–178. <https://doi.org/10.22059/ees.2020.43228>
- Kolotouchkina, O., Ripoll González, L., & Belabas, W. (2024). Smart cities, digital inequalities, and the challenge of inclusion. *Smart Cities*, 7(6), 3355–3370. <https://doi.org/10.3390/smartcities7060130>
- Kummitha, R. K. R. (2019). Smart cities and entrepreneurship: An agenda for future research. *Technological Forecasting and Social Change*, 149, 119763. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119763>
- Kummitha, R. K. R. (2025). Smart city governance: assessing modes of active citizen engagement. *Regional Studies*, 59(1). <https://doi.org/10.1080/00343404.2024.2399262>
- Lember, V., Brandsen, T., & Tönurist, P. (2019). The potential impacts of digital technologies on co-production and co-creation. *Public Management Review*, 21(11), 1665–1686. <https://doi.org/10.1080/14719037.2019.1619807>
- Levenda, A. M., Behrsin, I., & Disano, F. (2021). Renewable energy for whom? A global systematic review of the environmental justice implications of renewable energy technologies. *Energy Research & Social Science*, 71, 101837. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101837>
- Maheshwari, A., & Chopra, S.S. Actionable insights for equitable urban sustainability transition through building-level assessment of sustainable development goals. *npj Urban Sustain* 5, 63. <https://doi.org/10.1038/s42949-025-00238-4>
- Marchesani, F., & Ceci, F. (2025). A quadruple helix view on smart city: Exploring the effect of internal and external open innovation on public services digitalization. *Technovation*, 139, 103141. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2024.103141>
- Marengo, J. A., Galdos, M. V., Challinor, A., Cunha, A. P., Marin, F. R., Vianna, M. dos S., Alvala, R. C. S., Alves, L. M., Moraes, O. L., & Bender, F. (2021). Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. *Climate Resilience and Sustainability*, 1(3), e17. <https://doi.org/10.1002/cli2.17>
- Meijer, A., & Bolívar, M. P. R. (2016). Governing the smart city: A review of the literature on smart urban governance. *International Review of Administrative Sciences*, 82(2), 392–408. <https://doi.org/10.1177/0020852314564308>
- OECD. (2020). *Smart cities and inclusive growth: Building on the outcomes of the 1st OECD Roundtable on Smart Cities and Inclusive Growth*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/8a4ce475-en>
- Olbertz, M., Jafari, M., Papina, C., Abatzidi, A., Tzortzi, J. N., Mornar, N., Bokulic, M., & Timpe, A. (2025). The Quadruple Helix model in practice: Co-creating NBS requires novel governance approaches. *Urban Transformations*, 7(9). <https://doi.org/10.1186/s42854-025-00077-7>
- Paskaleva, K., Evans, J., & Watson, K. (2021). Co-producing smart cities: A Quadruple Helix approach to assessment. *European Urban and Regional Studies*, 28(4), 395–412. <https://doi.org/10.1177/09697764211016037>
- Pattinson, S., Damij, N., El Maalouf, N., Bazi, S., Elsahn, Z., Hilliard, R., & Cunningham, J. A. (2023). Building green innovation networks for people, planet, and profit: A multi-level, multi-value approach. *Industrial Marketing Management*, 115, 408–420. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2023.10.016>
- Paudel, S., & States, S. L. (2023). Urban green spaces and sustainability: Exploring the ecosystem services and disservices of grassy lawns versus floral meadows. *Urban Forestry & Urban Greening*, 84, 127932. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127932>

- Quan, X., & Solheim, M. C. W. (2023). Public-private partnerships in smart cities: A critical survey and research agenda. *City, Culture and Society*, 32, 100491. <https://doi.org/10.1016/j.ccs.2022.100491>
- Rathore, P. (2024). Adaptação às mudanças climáticas e resiliência de recursos em regiões semiáridas: Estratégias, desafios e estudos de caso. *Revista de Pesquisa em Ciências Aplicadas e Biotecnologia*, 3(5), 119–130. <https://doi.org/10.55544/jrasb.3.5.14>
- Regier, A. J., Berka, A. L., & Hoicka, C. E. (2025). Decarbonising cities: Exploring regional energy justice implications. *Local Environment*, 30(1), 1–18. <https://doi.org/10.1080/13549839.2025.2496162>
- Sander, L., Jung, C., & Schindler, D. (2024). Global review on environmental impacts of onshore wind energy in the field of tension between human societies and natural systems. *Energies*, 17(13), 3098. <https://doi.org/10.3390/en17133098>
- Sena, A., Freitas, C., Feitosa Souza, P., Carneiro, F., Alpino, T., Pedroso, M., Corvalan, C., & Barcellos, C. (2018). Drought in the semiarid region of Brazil: Exposure, vulnerabilities and health impacts from the perspectives of local actors. *PLOS Currents Disasters*, 10, <https://doi.org/10.1371/currents.dis.c226851ebd64290e619a4d1ed79c8639>
- Seto, K. C., Golden, J. S., Alberti, M., & Turner, B. L. (2017). Sustainability in an urbanizing planet. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(34), 8935–8938. <https://doi.org/10.1073/pnas.1606037114>
- Shah, S. S., Rana, I. A., Bhatti, S. S., & Azam, S. (2025). Assessing urbanization and climate change impacts on environmental sustainability in Gilgit city, Pakistan: A driver-pressure-state-impact-response framework approach. *Discover Cities*, 2(1), 72. <https://doi.org/10.1007/s44327-025-00113-y>
- Sharifi, A., Allam, Z., Bibri, S. E., & Khavarian-Garmsir, A. R. (2024). Smart cities and sustainable development goals (SDGs): A systematic literature review of co-benefits and trade-offs. *Cities*, 146, 104659. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104659>
- Silva, T. M. da; Santos, M. A. F.; Pereira, G. da P.; Oliveira, A. R. M. F.; Gama, E. V. S. (2024). Gestão de tecnologias sociais no Semiárido brasileiro e suas interfaces nos empreendimentos econômicos solidários: uma pesquisa bibliográfica. *Cadernos Macambira*, 9(1), 86-112. <https://doi.org/10.59033/cm.v9i1.1010>
- Smith, R. M., & Blizard, Z. D. (2021). A census tract level analysis of urban sprawl's effects on economic mobility in the United States. *Cities*, 115, 103232. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103232>
- Stephens, R. J. S. (2025). Quadruple Helix co-creation and cities: Behavioral and institutional changes in innovation capacities and cultures. *Cities*, 157, 105579. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105579>
- UN-Habitat. (2020). *World Cities Report 2020: The value of sustainable urbanization*. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/10/wcr_2020_report.pdf
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- United Nations. (2016). *New Urban Agenda*. Habitat III, Quito. Retrieved from <https://habitat3.org/the-new-urban-agenda/>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2019). *World urbanization prospects: The 2018 revision*. United Nations. <https://doi.org/10.18356/b9e995fe-en>
- Valencia-Arias, A., Martínez Rojas, E., García Pineda, V., Agudelo-Ceballos, E., Castañeda-Rodriguez, L. del R., Espinoza Requejo, C., Cardona-Acevedo, S., Londoño-Celis, W., & Alvitez Adan, T. E. (2025). Research trends on sustainable development in smart cities. *Discover Sustainability*, 6, 369. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01210-z>

- van Bueren, B. J. A., Leenders, M. A. A. M., Argus, K., Lim, W. M., Iyer-Raniga, U., & Sabani, A. (2025). Integrating sustainability into helix models for eco-innovation: The eco-5HM. *Technovation*, 143, 103211. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2025.103211>
- Virah-Sawmy, D., & Sturmberg, B. (2025). Socio-economic and environmental impacts of renewable energy deployments: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114956. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114956>
- Wang, Y., Ding, Q., Hao, X., Yang, H., & Qu, Z. (2025). A global assessment of the risks to biodiversity and Indigenous people's lands from solar and wind farms. *Geography and Sustainability*, 6(6), 100371. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2025.100371>
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford University Press.
- Zhao, X., Xu, Y., Vasa, L., & Shahzad, U. (2023). Entrepreneurial ecosystem and urban innovation: Contextual findings in the lens of sustainable development from China. *Technological Forecasting & Social Change*, 191, 122526. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122526>