Monge-Ganuzas, M. (2026). ¿Por qué es importante la geodiversidad para la biodiversidad y para las personas? En Afonso-Carrillo, J. (Ed.), *Patrimonio Geológico. La memoria de la Tierra*, pp. 15-52. XXI Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz. ISBN: 978-84-09-92546-9 https://doi.org/10.56029/SCTB2101MG



1. ¿Por qué es importante la geodiversidad para la biodiversidad y para las personas?

Manu Monge-Ganuzas

Asociación Internacional para la Conservación del Patrimonio Geológico ProGEO
progeo.europe@gmail.com

La geodiversidad –entendida como la variedad natural de materiales, formas, procesos geológicos y suelos, así como sus relaciones espaciales y temporales– constituye la base física que sostiene la biodiversidad y una amplia gama de bienes y servicios para las personas. En las últimas décadas se han acumulado evidencias que muestran que el uso de índices de geodiversidad mejora la explicación y la predicción de la abundancia y distribución de las especies, porque incorpora aspectos de la heterogeneidad ambiental que no quedan reflejados únicamente por el clima. Paralelamente, el desarrollo conceptual de la teoría de los servicios de los ecosistemas y de las contribuciones de la naturaleza a las personas ha permitido hacer explícitas las aportaciones abióticas tradicionalmente invisibilizadas en los marcos convencionales de los servicios de los ecosistemas.

Este trabajo ofrece una revisión deliberadamente divulgativa del papel de la geodiversidad como soporte de la biodiversidad, reguladora de procesos ecológicos y proveedora de beneficios materiales, culturales y de conocimiento para las sociedades. A partir de ejemplos internacionales y, de forma destacada, del contexto volcánico de Canarias, se analizan los mecanismos que vinculan geodiversidad, biodiversidad y bienestar humano, y se discuten implicaciones prácticas para la planificación territorial, la conservación, la gestión del riesgo y las políticas públicas en un escenario de cambio global.

Introducción
La base física de los ecosistemas

La geodiversidad de un territorio se define como la variedad natural de elementos geológicos –incluyendo rocas, minerales, fósiles, formas del relieve, procesos y suelos– junto con las relaciones, estructuras y sistemas que emergen de su interacción y que se expresan en el paisaje (Gray, 2013). Esta diversidad física constituye el soporte material sobre el que se desarrollan los ecosistemas y condiciona de manera decisiva la distribución de hábitats, la disponibilidad de recursos y los gradientes ambientales que estructuran las comunidades biológicas (Fig. 1).



Fig. 1. Complejo volcánico Teide-Pico Viejo y Las Cañadas (Tenerife). Vista panorámica de la Caldera de Las Cañadas del Teide, donde se observa la coexistencia de coladas volcánicas, domos y conos de distinta edad y composición. El alto índice de geodiversidad del sistema volcánico genera marcados gradientes altitudinales y microclimáticos que controlan la formación de suelos, la distribución de hábitats y la organización de las comunidades biológicas, actuando además como un archivo geológico fundamental para reconstruir la evolución volcánica y climática del archipiélago canario. Fuente: ISS 24-10-2002, NASA.

Durante buena parte del desarrollo de las ciencias ecológicas, estos componentes abióticos fueron considerados un mero telón de fondo estático frente al protagonismo otorgado a los organismos vivos. Sin embargo, la investigación contemporánea ha demostrado que la base abiótica no solo sustenta, sino que participa activamente en la estructura, el funcionamiento y

la resiliencia de los ecosistemas. La litología, la topografía, la dinámica geomorfológica o las propiedades de los suelos influyen directamente en los ciclos biogeoquímicos, en la regulación hidrológica, en los flujos de energía o en la respuesta de los sistemas naturales frente a perturbaciones naturales o antrópicas (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Desde sus orígenes, el propio concepto de ecosistema reconoce esta coproducción de funciones por parte de la naturaleza viva y no viva. Tansley (1935) definió el ecosistema como un sistema físico integrado, en el que los componentes bióticos y abióticos interactúan mediante flujos de energía y materia. Esta idea fue desarrollada posteriormente por Odum (1953), quien subrayó que los procesos ecológicos solo pueden comprenderse a partir del estudio conjunto de los organismos y de su entorno fisicoquímico. Esta concepción sistémica sigue plenamente vigente y se refleja en la definición adoptada por el Convenio sobre la Diversidad Biológica, que entiende el ecosistema como un complejo dinámico de comunidades de organismos vivos y su medio abiótico que interactúan como una unidad funcional (Convention on Biological Diversity, 1992).

En este marco, la geodiversidad emerge como un factor clave para explicar la heterogeneidad ambiental y la diversidad biológica asociada. La variabilidad del sustrato geológico y del relieve genera mosaicos de condiciones microclimáticas, edáficas e hidrológicas que amplían el espectro de nichos disponibles y favorecen la coexistencia de especies, incrementando la biodiversidad y la estabilidad de los ecosistemas a distintas escalas espaciales y temporales (Beier *et al*., 2015; Lawler *et al*., 2015). Asimismo, la base física condiciona la velocidad y dirección de los procesos de cambio, influyendo en la capacidad de adaptación de los sistemas socioecológicos frente al cambio climático y otras presiones globales. En consecuencia, ningún ecosistema puede ser comprendido ni gestionado adecuadamente sin considerar explícitamente el papel del medio físico. Integrar la geodiversidad en los marcos conceptuales y operativos de la ecología, la conservación, la restauración y la planificación territorial no solo mejora la comprensión de los procesos naturales, sino que también permite diseñar estrategias de gestión más robustas, preventivas y resilientes, alineadas con una visión verdaderamente integral de la naturaleza.

De los servicios ecosistémicos a las contribuciones de la naturaleza

Con el objetivo de sistematizar las múltiples formas en que la naturaleza contribuye al bienestar humano, a comienzos del siglo XXI se consolidó el marco de los servicios ecosistémicos, especialmente a partir de la publicación de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Este enfoque supuso un punto de inflexión al vincular explícitamente el funcionamiento de los

ecosistemas con dimensiones clave del bienestar humano –salud, seguridad, medios de vida y calidad de vida– y al proporcionar un lenguaje común para integrar consideraciones ecológicas en la toma de decisiones públicas.

La clasificación propuesta por la Evaluación distinguió grandes categorías de servicios de provisión, regulación, culturales y, en un plano más basal, servicios de soporte, entendidos estos últimos como los procesos ecológicos que sostienen la producción del resto de servicios (Fig. 2). Aunque esta tipología no estuvo exenta de críticas conceptuales, resultó altamente influyente al facilitar la comunicación entre científicos, gestores y responsables políticos, y al promover la incorporación de los servicios ecosistémicos en la planificación territorial, la evaluación de impactos y las estrategias de conservación.

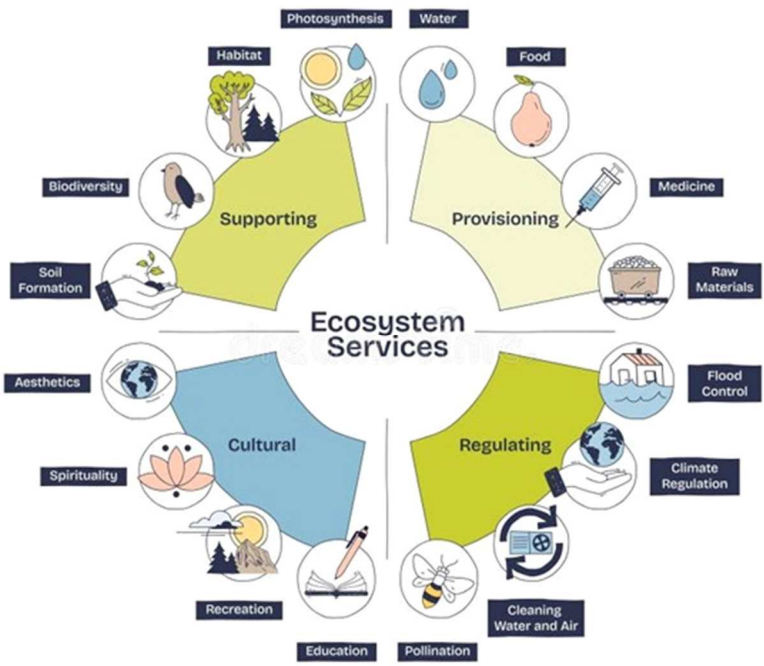


Fig. 2. Marco conceptual clásico de los servicios ecosistémicos y sus limitaciones. Esquema sintético de los servicios ecosistémicos organizado en cuatro grandes categorías –servicios de soporte, provisión, regulación y culturales– ampliamente utilizado para representar las contribuciones de los ecosistemas al bienestar humano. Aunque este enfoque ha sido instrumental para integrar la naturaleza en la toma de decisiones, la figura refleja también su tendencia a centrarse en componentes y procesos bióticos, relegando a un segundo plano el papel estructural y funcional de la geodiversidad. Este esquema sirve, así como punto de partida para transitar hacia marcos más integradores, como el de las contribuciones de la naturaleza a las personas (NCP), en los que la base física del territorio y sus valores instrumentales, relacionales e intrínsecos se incorporan de forma explícita.

A partir de este marco inicial, la economía ecológica y la ciencia de la valoración ambiental desarrollaron enfoques más refinados orientados a clarificar la relación entre funciones ecosistémicas, servicios y beneficios finales para las personas, así como, a resolver problemas metodológicos como la doble contabilización. En este contexto, se propuso centrar la atención en los servicios finales efectivamente utilizados por la sociedad, diferenciándolos de los procesos ecológicos subyacentes, lo que permitió avanzar hacia evaluaciones más consistentes y operativas (de Groot *et al*., 2010).

La adopción de clasificaciones estandarizadas, como la *Common International Classification of Ecosystem Services* (CICES), supuso un paso decisivo en esta dirección. CICES proporcionó una estructura jerárquica orientada explícitamente al uso en cartografía, evaluación y contabilidad ambiental, facilitando la comparabilidad entre estudios y su integración en marcos internacionales de estadística ambiental y económica, como el *System of Environmental-Economic Accounting – Ecosystem Accounting* (Haines-Young & Potschin-Young, 2018; United Nations, 2021).

No obstante, a medida que el enfoque de los servicios ecosistémicos se generalizó, también se hicieron evidentes sus limitaciones. En particular, se señaló su tendencia a privilegiar valores instrumentales y utilitaristas de la naturaleza, así como su dificultad para capturar adecuadamente dimensiones culturales, identitarias y relacionales, o valores que no se manifiestan directamente a través de beneficios materiales o funcionales. Estas críticas impulsaron el desarrollo de marcos conceptuales más inclusivos.

En este contexto, la Plataforma Intergubernamental sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas (IPBES) introdujo el concepto de contribuciones de la naturaleza a las personas (Nature's Contributions to People, NCP). Este enfoque amplía la perspectiva estrictamente ecosistémica al reconocer explícitamente la pluralidad de valores asociados a la naturaleza –instrumentales, relacionales e intrínsecos– y al subrayar el papel mediador de la cultura, las instituciones, los sistemas de conocimiento y las cosmovisiones en la forma en que las sociedades perciben, usan y valoran la naturaleza (Díaz *et al*., 2018).

El marco NCP no sustituye el concepto de servicios ecosistémicos, sino que lo reinterpreta y contextualiza, integrándolo en una visión más amplia de los sistemas socioecológicos. Desde esta perspectiva, las contribuciones de la naturaleza no se entienden únicamente como flujos biofísicos, sino como resultados emergentes de la interacción entre procesos ecológicos, estructuras biofísicas y dinámicas sociales.

En este giro conceptual, la geodiversidad y los procesos abióticos adquieren un protagonismo renovado. Al ser componentes estructurales del patrimonio natural, la diversidad geológica, geomorfológica y edáfica sustenta tanto contribuciones materiales –como la provisión de agua,

materias primas, suelos fértiles o regulación de peligros naturales– como contribuciones no materiales vinculadas al sentido del lugar, la identidad cultural, el patrimonio, el conocimiento y las experiencias recreativas y espirituales. Reconocer explícitamente esta base física permite visibilizar aportaciones históricamente infrarrepresentadas y avanzar hacia marcos de evaluación y gestión más integrales y coherentes con la complejidad de la relación sociedad–naturaleza.

Servicios de los geosistemas y geodiversidad

El concepto de servicios de los ecosistemas de la geodiversidad, también denominados «servicios de los geosistemas», surge con el propósito de hacer visibles aquellas contribuciones al bienestar humano y al funcionamiento de los sistemas ecológicos que se originan directa o predominantemente en la geodiversidad, o bien en su interacción con la biota. Esta perspectiva pone el foco en los beneficios derivados de procesos y componentes de las rocas y sedimentos y de procesos geomorfológicos, hidrológicos y edáficos –como la regulación natural de riesgos geológicos e hidrológicos, la formación y mantenimiento de suelos, el soporte físico de los ecosistemas, el almacenamiento y circulación de agua subterránea o la provisión de materiales– que con frecuencia quedan implícitos, diluidos o infrarrepresentados en marcos analíticos centrados principalmente en la biodiversidad (Gordon & Barron, 2013).

A diferencia de aproximaciones que consideran lo abiótico únicamente como soporte pasivo de los ecosistemas, los servicios de los geosistemas subrayan el carácter procesual y dinámico de la base física, reconociendo que muchos beneficios clave dependen de la continuidad de procesos geológicos activos (Fig. 3). La dinámica fluvial y costera, la evolución del relieve, la meteorización de las rocas o la recarga de acuíferos no solo condicionan la distribución de los hábitats y las comunidades biológicas, sino que generan beneficios directos para las sociedades humanas, como la protección frente a inundaciones y erosión, la fertilidad edáfica o la disponibilidad de recursos hídricos.

Desde esta visión, la provisión de materiales geológicos –rocas, áridos, minerales, recursos energéticos– puede entenderse como un servicio de provisión de los geosistemas, pero también lo son funciones menos visibles pero fundamentales, como el almacenamiento de carbono en sedimentos, la regulación natural de riesgos gravitacionales y sísmicos, o la creación de gradientes topográficos y litológicos que sostienen la heterogeneidad ambiental. Estos servicios no son independientes de la biodiversidad, sino que se coproducen a través de la interacción entre procesos abióticos y biológicos, reforzando la necesidad de abordajes integrados.

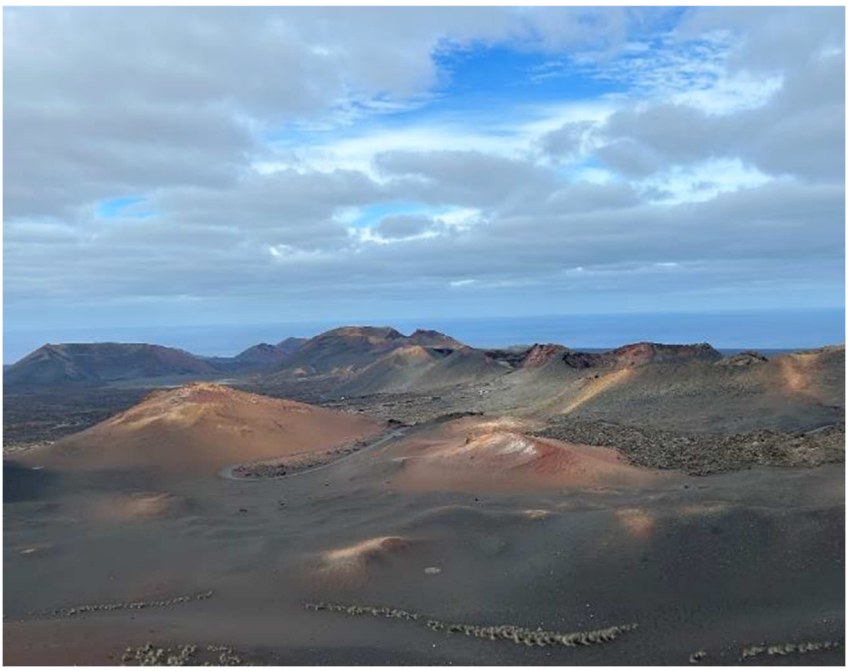


Fig. 3. Parque Nacional de Timanfaya – Montañas del Fuego (Lanzarote). Campos extensos de coladas basálticas históricas (erupciones de 1730–1736), en los que la rugosidad del sustrato volcánico, la elevada heterogeneidad superficial y los procesos de meteorización temprana controlan de forma activa la colonización biológica y la génesis inicial de suelos. Este paisaje volcánico ilustra de manera clara la geodiversidad como sistema dinámico y funcional –no como mero soporte pasivo–, integrando servicios de soporte ecológico, provisión edáfica y valores científicos, educativos y culturales asociados al patrimonio geológico canario.

Reconocer explícitamente los servicios de los geosistemas aporta un marco conceptual y operativo clave para la planificación territorial, la evaluación ambiental estratégica y la gestión sostenible de los recursos naturales. Al identificar de manera diferenciada las contribuciones de la base física, se mejora la capacidad de anticipar impactos, evitar externalidades negativas y diseñar medidas de gestión que respeten los límites y ritmos de los procesos naturales. Asimismo, este enfoque permite visibilizar conflictos y sinergias entre usos del suelo, conservación y aprovechamiento de recursos, especialmente en contextos de alta presión antrópica como zonas costeras, cuencas fluviales o áreas montañosas.

Desde una perspectiva de cambio global, los servicios de los geosistemas resultan especialmente relevantes para la resiliencia de los sistemas socioecológicos. La diversidad geológica incrementa la capacidad de los territorios para amortiguar perturbaciones, ofrecer refugios climáticos y

mantener funciones ecosistémicas bajo escenarios de cambio climático, degradación del suelo o eventos extremos. En este sentido, la geodiversidad actúa como una «infraestructura natural» de larga duración, proporcionando opciones de adaptación tanto para la biodiversidad como para las sociedades humanas (Fox *et al*., 2020).

En definitiva, la incorporación explícita de los servicios de los geosistemas contribuye a superar la infravaloración sistemática de los componentes abióticos y a integrar plenamente la geodiversidad como parte esencial de la naturaleza. Este reconocimiento no solo es coherente con los avances conceptuales hacia marcos más inclusivos, como las contribuciones de la naturaleza a las personas, sino que refuerza una visión más completa y realista de la base física sobre la que se sostienen los ecosistemas y el bienestar humano.

Evidencia empírica del vínculo entre geodiversidad y biodiversidad

A. Índices de geodiversidad y modelos de diversidad

En la última década se ha producido un avance significativo en la cuantificación de la geodiversidad, impulsado por el desarrollo de índices que integran de forma explícita la diversidad de materiales geológicos, las formas del relieve, los suelos y, en algunos casos, la intensidad o variedad de procesos geomorfológicos activos. Estos avances han sido posibles gracias a la creciente disponibilidad de datos espaciales de alta resolución –como modelos digitales del terreno, cartografía geológica armonizada y bases de datos edáficas– así como al uso generalizado de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métodos de análisis espacial reproducibles (Hjort *et al*., 2012; Zakšek *et al*., 2011).

Diversos estudios han demostrado que la incorporación de métricas de geodiversidad mejora sustancialmente la capacidad explicativa y predictiva de los modelos de riqueza, abundancia y distribución de especies, en comparación con modelos basados exclusivamente en variables climáticas o de cobertura del suelo. Este patrón se ha constatado en una amplia variedad de contextos biogeográficos, incluyendo paisajes boreales y templados de Europa septentrional (Alahuhta *et al*., 2020), sistemas montañosos como los Alpes y los Cárpatos (Bailey *et al*., 2017), regiones árticas (Hjort *et al*., 2015), islas oceánicas volcánicas y áreas semiáridas, y para diferentes grupos taxonómicos, desde plantas vasculares y líquenes hasta invertebrados y vertebrados (Stein *et al*., 2014).

Los resultados convergen en señalar que la geodiversidad actúa como un determinante proximal de la heterogeneidad ambiental, al generar un mosaico de condiciones locales que no queda adecuadamente reflejado por

variables climáticas regionales promediadas. La variabilidad del relieve, la litología y los suelos da lugar a microclimas contrastados, a gradientes edáficos e hidrológicos abruptos y a una diversidad de sustratos físicos y geoquímicos que amplían el espectro de nichos disponibles. Estos efectos son especialmente evidentes a escalas locales y mesorregionales, donde pequeñas variaciones topográficas –como cambios de orientación, pendiente o rugosidad– o litológicas pueden traducirse en diferencias ecológicas marcadas (Parks *et al*., 2020).

En regiones volcánicas oceánicas como Canarias, la relevancia de la geodiversidad como predictor ecológico resulta particularmente clara. La coexistencia de materiales volcánicos de distinta composición y edad, la elevada rugosidad topográfica, la presencia de coladas recientes, conos volcánicos, dorsales, barrancos profundos y plataformas costeras, así como los fuertes gradientes altitudinales en distancias muy cortas, generan una extraordinaria heterogeneidad ambiental (Fig. 1). Esta combinación explica, en buena medida, la alta diversidad florística y los elevados niveles de endemicidad del archipiélago, así como la marcada zonación de ecosistemas, desde el litoral hasta los pinares y los bosques de laurisilva (Fernández-Palacios *et al*., 2016; Whittaker *et al*., 2008). Estudios recientes han mostrado que variables vinculadas al relieve y al sustrato volcánico mejoran la explicación de los patrones de distribución de plantas endémicas canarias, incluso cuando se controlan los efectos del clima (Irl *et al*., 2015).

Desde una perspectiva metodológica, la geodiversidad aporta información no redundante frente a los predictores climáticos clásicos. Mientras que las variables climáticas capturan forzamientos de gran escala, los índices de geodiversidad reflejan propiedades relativamente estables del territorio y la capacidad del medio físico para modular dichos forzamientos, actuando como amortiguadores frente a la variabilidad climática interanual o a los cambios de largo plazo. Esta complementariedad explica por qué los modelos que integran clima y geodiversidad suelen mostrar un mejor ajuste estadístico, una mayor estabilidad espacial y una mayor robustez transferencial (Albano *et al*., 2021).

Asimismo, el uso de índices de geodiversidad está adquiriendo una importancia creciente en escenarios de cambio climático, en los que se busca identificar áreas con mayor potencial para mantener la diversidad biológica a lo largo del tiempo. En este contexto, la geodiversidad se ha propuesto como un indicador o proxy de la «capacidad adaptativa del paisaje», al reflejar la disponibilidad de refugios topográficos, edáficos e hidrológicos que facilitan la persistencia de especies bajo condiciones ambientales cambiantes. Este enfoque ha sido aplicado con éxito tanto en grandes sistemas montañosos como en islas volcánicas y regiones áridas, aportando criterios operativos para la priorización espacial de la conservación (Dobrowski, 2011).

En conjunto, estos avances refuerzan la idea de que la geodiversidad desempeña un papel activo en la configuración y el mantenimiento de los patrones de biodiversidad. Incorporar índices de geodiversidad en modelos ecológicos y en herramientas de planificación territorial permite mejorar la comprensión de los procesos que generan diversidad biológica y diseñar estrategias de conservación más eficaces, resilientes y espacialmente explícitas, tanto en contextos continentales como insulares, incluyendo regiones de alta complejidad físico-ambiental como el archipiélago canario.

B. Heterogeneidad topográfica, suelos y dependencias taxonómicas

La heterogeneidad topográfica emerge de forma consistente como uno de los predictores más robustos de la diversidad biológica, si bien la magnitud y la dirección de su efecto varían en función del grupo taxonómico considerado, de los rasgos funcionales de los organismos y de la escala espacial de análisis. La variabilidad del relieve –expresada a través de gradientes de pendiente, orientación, altitud, curvatura o rugosidad– genera un amplio rango de condiciones microclimáticas y edáficas que incrementan la disponibilidad de nichos ecológicos y favorecen la coexistencia de especies, especialmente en grupos estrechamente vinculados al sustrato físico y a procesos de pequeña escala (Leempoel *et al*., 2015; Zarnetske *et al*., 2019).

En el caso de la diversidad arbórea y de plantas vasculares, numerosos estudios han documentado relaciones positivas y relativamente consistentes entre riqueza de especies, heterogeneidad topográfica y diversidad de suelos. Estas relaciones reflejan la dependencia directa de las plantas respecto a factores como la profundidad y textura del suelo, la disponibilidad y estacionalidad del agua, la química edáfica y la exposición solar, todos ellos fuertemente modulados por la topografía y la litología subyacente. En sistemas montañosos continentales, como los Alpes o las Montañas Rocosas, la combinación de gradientes altitudinales abruptos, orientaciones contrastadas y una elevada diversidad litológica se traduce en una alta diversidad florística y en la coexistencia de comunidades con requerimientos ecológicos muy distintos en espacios relativamente reducidos (Scherrer & Körner, 2011; Bailey *et al*., 2018). En islas volcánicas, estos efectos se ven reforzados por la elevada variabilidad de materiales y la rápida evolución de los suelos. En Canarias, la superposición de coladas basálticas de distinta edad, suelos poco evolucionados junto a andosoles desarrollados, y una topografía extremadamente accidentada genera una notable heterogeneidad edáfica y microclimática.

En otros grupos taxonómicos, como las aves y los mamíferos, la relación con la heterogeneidad topográfica resulta más contextual y mediada por procesos indirectos. En estos casos, la topografía influye menos como factor limitante directo y más como configuradora de la estructura del paisaje, al condicionar la diversidad de hábitats, la disponibilidad de recursos, la

conectividad funcional entre parches y los patrones de recambio de especies. Estudios realizados en paisajes templados y mediterráneos muestran que la diversidad ornitológica responde a la interacción entre heterogeneidad topográfica, cobertura del suelo y uso humano del territorio, con efectos que varían según la escala de análisis y la capacidad de dispersión de las especies (Read *et al*., 2020).

En el contexto canario, la influencia indirecta de la topografía sobre la fauna es también evidente. Los profundos barrancos, los escarpes volcánicos y las plataformas costeras generan una fuerte compartimentación del territorio que condiciona la distribución de aves terrestres y rapaces, así como de reptiles endémicos con baja capacidad de dispersión. En estos casos, la heterogeneidad topográfica contribuye a aumentar la diversidad regional, pero también puede favorecer procesos de aislamiento poblacional y diferenciación genética, especialmente en especies con requerimientos de hábitat muy específicos (Illera *et al*., 2012; Emerson & Gillespie, 2008).

Estos resultados ponen de manifiesto que la geodiversidad –y, en particular, la heterogeneidad topográfica y edáfica– no actúa como un factor universalmente positivo sobre la biodiversidad, sino como un modulador de la heterogeneidad ambiental cuyos efectos dependen de los rasgos funcionales de los organismos, de sus estrategias de dispersión y tolerancia ambiental, y de la escala espacial considerada. A escalas finas, la topografía genera refugios microclimáticos, gradientes edáficos abruptos y condiciones de alta variabilidad ambiental; a escalas más amplias, su influencia se manifiesta a través del control de la estructura del paisaje, de los gradientes regionales y de los procesos de conectividad ecológica.

Desde un punto de vista metodológico y aplicado, estos hallazgos subrayan la necesidad de enfoques multiescalares y taxonómicamente explícitos en el análisis de la relación entre geodiversidad y biodiversidad. Integrar métricas de heterogeneidad topográfica y diversidad de suelos ajustadas a la ecología de los distintos grupos biológicos resulta clave para mejorar la interpretación de los patrones de diversidad y para orientar estrategias de conservación y planificación territorial más eficaces, especialmente en territorios complejos y altamente heterogéneos como los sistemas montañosos e insulares volcánicos, entre ellos el archipiélago canario.

Geodiversidad, islas volcánicas y sistemas costeros: el caso de Canarias

Las islas volcánicas constituyen laboratorios naturales privilegiados para analizar las relaciones entre geodiversidad, biodiversidad y beneficios sociales, debido a la fuerte impronta del sustrato geológico en la

configuración del territorio y a la rápida generación de contrastes ambientales en espacios reducidos. En el archipiélago canario, esta condición se ve intensificada por la coexistencia de islas con edades geológicas muy diferentes, desde Fuerteventura y Lanzarote –con edificaciones volcánicas mayoritariamente miocenas y pliocenas– hasta El Hierro, cuya actividad volcánica histórica y reciente ilustra un sistema aún en evolución. A ello se suma una notable diversidad de estilos eruptivos, desde volcanismo fisural y estromboliano hasta fases freatomagmáticas y episodios explosivos más evolucionados (Carracedo & Troll, 2016; Martí *et al*., 2013).

La sucesión de edificios volcánicos, coladas basálticas de distinta composición y edad, conos estrombolianos, domos traquíticos, grandes deslizamientos gravitacionales, barrancos profundamente encajados y una amplia variedad de formas costeras –acantilados activos, plataformas de abrasión, playas de arena volcánica, deltas lávicos y tubos volcánicos litorales– genera gradientes abruptos de altitud, exposición, clima, suelos y disponibilidad hídrica en distancias muy cortas. Esta compleja base física da lugar a una marcada heterogeneidad ambiental que condiciona decisivamente la distribución de los hábitats, la estructura de los ecosistemas terrestres y marinos, y la aparición de elevados niveles de endemicidad y especialización ecológica (Whittaker & Fernández-Palacios, 2007).

Paisajes emblemáticos como las Cañadas del Teide, con su gran anfiteatro volcánico de alta montaña, sus coladas diferenciadas por edad y composición, y sus contrastes extremos de temperatura y radiación; la Caldera de Taburiente, resultado de una compleja interacción entre volcanismo constructivo, erosión fluvial y colapsos gravitacionales (Fig. 4); los grandes anfiteatros de deslizamiento de El Golfo y Las Playas, en El Hierro; o los extensos campos de lavas históricas del Parque Nacional de Timanfaya, en Lanzarote, ilustran de manera clara cómo la geodiversidad estructura los patrones de biodiversidad y la organización espacial de los ecosistemas. En estos contextos, la topografía, la litología, la edad del sustrato y la dinámica geomorfológica condicionan la génesis de los suelos, la retención de humedad, la exposición al viento y a la radiación solar, favoreciendo la coexistencia de comunidades contrastadas y la persistencia de especies altamente especializadas, como numerosas plantas endémicas adaptadas a sustratos jóvenes, escoriáceos o inestables (Fernández-Lugo *et al*., 2013).

La influencia de la geodiversidad resulta igualmente evidente en la diferenciación de los grandes sistemas ecológicos insulares. La presencia de barrancos profundos y orientaciones contrastadas en las islas occidentales favorece el desarrollo de laurisilva y bosques termófilos en condiciones de elevada humedad orográfica, mientras que, en las islas orientales, más antiguas, bajas y erosionadas, dominan ecosistemas xerófilos asociados a sustratos edáficos más someros y a una menor complejidad topográfica. Esta

relación directa entre relieve, edad geológica y diversidad biológica sitúa a Canarias como un ejemplo paradigmático del papel de la geodiversidad en sistemas insulares volcánicos.



Fig. 4. Caldera de Taburiente (La Palma). Gran depresión erosiva-volcánica resultante de la interacción entre volcanismo constructivo, colapsos gravitacionales y una intensa erosión fluvial. La topografía y la diversidad de materiales y formas del relieve generan una elevada heterogeneidad de hábitats y controlan la dinámica hidrológica insular. Constituye un paisaje emblemático con un fuerte valor identitario y cultural, donde la geodiversidad actúa como base integradora del soporte ecológico, la regulación de los procesos erosivos y los valores culturales asociados al territorio. Fuente: Google Maps.

Al mismo tiempo, estos paisajes volcánicos y costeros han adquirido un destacado valor cultural, identitario y simbólico, profundamente arraigado en la historia y la percepción social del territorio. Elementos geológicos singulares como los roques, malpaíses, tubos volcánicos, jameos o acantilados han sido tradicionalmente incorporados a usos agrícolas, ganaderos y pesqueros, así como a narrativas culturales y prácticas locales. La geodiversidad canaria no solo sustenta funciones ecológicas, sino que genera contribuciones no materiales vinculadas al sentido del lugar, el patrimonio cultural, la educación y la recreación. En la actualidad, el relieve volcánico y los paisajes costeros constituyen uno de los principales activos del modelo turístico insular, especialmente en ámbitos como el senderismo, la observación de la naturaleza y el geoturismo.

La declaración del Geoparque Mundial de la UNESCO de El Hierro (2014) y del Geoparque de Lanzarote y el Archipiélago Chinijo (2015) representa un reconocimiento explícito de la geodiversidad canaria como patrimonio natural de relevancia internacional y como recurso estratégico para el desarrollo sostenible. Estos geoparques promueven modelos de gestión que integran conservación, educación, divulgación científica y geoturismo, reforzando el vínculo entre la población local y su entorno geológico y contribuyendo a diversificar las economías insulares desde una perspectiva territorialmente arraigada y basada en el conocimiento (UNESCO, 2016).

En los sistemas costeros, la interacción entre procesos volcánicos, marinos y biológicos adquiere una relevancia particular. Los acantilados activos del norte de Tenerife y La Palma, las plataformas rocosas intermareales, los sebadales asociados a fondos volcánicos someros y las playas negras de origen basáltico constituyen sistemas de elevada productividad ecológica y alta dinámica geomorfológica. En estos entornos, la geodiversidad condiciona tanto la biodiversidad marina y litoral como la provisión de servicios de regulación, como la disipación de la energía del oleaje, la protección frente a la erosión y la configuración de hábitats clave para numerosas especies de invertebrados, peces y aves marinas (Masselink & Gehrels, 2014; Rangel-Buitrago *et al*., 2018) (Fig. 5).



Fig. 5. Acantilados de Los Gigantes (Tenerife). Acantilados volcánicos de gran altura que constituyen una de las principales estructuras geomorfológicas del litoral occidental de Tenerife. Estas paredes rocosas actúan como sistemas naturales de disipación de la energía del oleaje y condicionan la dinámica sedimentaria y erosiva costera, contribuyendo a la protección frente a la erosión marina. Al mismo tiempo, la morfología abrupta del acantilado proporciona hábitats clave para comunidades marinas y aves nidificantes, y configura un paisaje litoral de elevado valor escénico, donde la geodiversidad desempeña un papel determinante en la regulación costera y en la estructura física del territorio.

El caso canario pone de manifiesto que la geodiversidad es un componente esencial para comprender la singularidad ecológica y cultural de las islas volcánicas y de sus sistemas costeros. Reconocer explícitamente el papel de los procesos geológicos en el soporte de la biodiversidad y la generación de bienestar humano resulta clave para diseñar estrategias de conservación, ordenación territorial y desarrollo sostenible más integradas, resilientes y adaptadas a la complejidad de los sistemas socioecológicos insulares.

Servicios de regulación y mantenimiento

La geodiversidad desempeña un papel esencial en los servicios de regulación y mantenimiento, al controlar procesos ecológicos fundamentales que sostienen tanto el funcionamiento de los ecosistemas como la seguridad y el bienestar de las sociedades humanas. Las formas del relieve, los materiales geológicos y los procesos geomorfológicos activos regulan flujos de agua, sedimentos, energía y nutrientes, actuando como infraestructuras naturales de larga duración que modulan forzamientos climáticos y reducen la exposición a riesgos naturales.

En archipiélagos volcánicos, la relación entre geodiversidad y los procesos atmosféricos y oceánicos resulta especialmente estrecha. En Canarias, los fuertes gradientes topográficos y la disposición del relieve volcánico condicionan la circulación atmosférica local y regional, influyendo de manera decisiva en la formación de la inversión térmica, en los regímenes de alisio y en los patrones de nubosidad orográfica. Las medianías septentrionales de Tenerife, La Palma o Gran Canaria actúan como barreras topográficas que favorecen la condensación de humedad y el desarrollo del «mar de nubes», regulando la disponibilidad hídrica y el microclima de ecosistemas como la laurisilva (Fig. 6).

Asimismo, la naturaleza volcánica de los suelos y rocas influye en la química atmosférica y en la calidad del aire a escala local, especialmente en contextos de actividad eruptiva o desgasificación difusa, como se ha observado históricamente en El Hierro y La Palma. A escala oceánica, las plataformas volcánicas someras, los cabos y los accidentes submarinos influyen en la dinámica de corrientes y afloramientos, modulando la productividad marina y los flujos de nutrientes en el entorno insular (Barton *et al*., 2000). Estos procesos contribuyen indirectamente a la regulación climática y al ciclo hidrológico insular, reforzando el acoplamiento entre sistemas terrestres y marinos.

Los procesos terrestres controlados por la geodiversidad –incluyendo el ciclo de las rocas, los ciclos biogeoquímicos y los procesos geomorfológicos– desempeñan un papel clave en la regulación del clima y de los riesgos naturales. En Canarias, el volcanismo reciente y la continua

meteorización de materiales basálticos favorecen la fijación y almacenamiento de carbono inorgánico en suelos jóvenes y en depósitos volcánicos alterados, contribuyendo al secuestro de carbono a largo plazo (Moulton *et al*., 2000; Dessert *et al*., 2003).



Fig. 6. Relieves volcánicos abruptos de Anaga (Tenerife). La topografía escarpada del macizo controla la elevación y persistencia de la nubosidad orográfica, regulando de forma activa el microclima local y la disponibilidad hídrica. Este proceso físico, directamente condicionado por la geodiversidad, sustenta la distribución de comunidades vegetales de elevada biodiversidad y endemicidad, evidenciando el vínculo funcional entre relieve volcánico, dinámica atmosférica y sistemas ecológicos insulares.

La dinámica geomorfológica asociada a laderas volcánicas, barrancos y acantilados regula además el balance sedimentario y el control natural de la erosión. La presencia de coladas antiguas estabilizadas, conos volcánicos erosionados y paleosuelos intercalados reduce la movilización masiva de sedimentos, mientras que los grandes deslizamientos gravitacionales –como los de La Orotava (Tenerife) o El Golfo (El Hierro)– configuran la topografía y condicionan la distribución espacial del riesgo geológico, actuando como elementos clave en la planificación territorial y la prevención de desastres (Masson *et al*., 2002).

En sistemas fluviales y torrenciales, elementos geomorfológicos como llanuras de inundación, terrazas fluviales y abanicos aluviales funcionan como dispositivos naturales de laminación de avenidas, atenuando los picos de caudal durante episodios extremos (Ward *et al*., 1999). Aunque en Canarias los cursos de agua son mayoritariamente efímeros, los barrancos

desempeñan funciones análogas. Ejemplos como los barrancos de Agaete (Gran Canaria), Badajoz (Tenerife) o Las Angustias (La Palma) actúan como corredores naturales de drenaje y transporte sedimentario, reduciendo el riesgo de inundaciones súbitas en episodios de lluvias intensas y contribuyendo a la recarga hídrica en los tramos altos y medios (Custodio, 2007; Romero-Díaz *et al*., 2018).

En el ámbito litoral, la regulación de inundaciones marinas se ve reforzada por playas volcánicas, campos dunares fósiles y plataformas rocosas costeras que disipan la energía del oleaje y amortiguan el impacto de temporales. Estos elementos naturales son considerados como Soluciones Basadas en la Naturaleza frente al ascenso del nivel del mar y los eventos extremos asociados al cambio climático (Fig. 7).



Fig. 7. Paisaje litoral del Parque Natural del Archipiélago Chinijo (La Graciosa), caracterizado por playas volcánicas, campos dunares fósiles y amplias plataformas rocosas costeras de baja cota. Estos elementos geomorfológicos disipan la energía del oleaje y amortiguan el impacto de temporales marinos, reforzando la regulación natural frente a inundaciones costeras. El conjunto ejemplifica el papel de la geodiversidad litoral como solución basada en la naturaleza para la protección del litoral ante el ascenso del nivel del mar y el incremento de eventos extremos asociados al cambio climático, integrando funciones de regulación costera con elevados valores paisajísticos y ecológicos.

La regulación de la calidad del agua constituye otro servicio fundamental vinculado a la geodiversidad. Suelos volcánicos, depósitos piroclásticos y formaciones geológicas porosas actúan como filtros naturales que retienen contaminantes, atenúan la carga de sedimentos y regulan la composición

química del agua infiltrada. En Canarias, la elevada permeabilidad de coladas basálticas fracturadas y la presencia de paleosuelos arcillosos favorecen procesos de filtración natural y almacenamiento subterráneo, contribuyendo a mantener la calidad de los acuíferos insulares (Cabrera *et al*., 2012). Estos procesos son especialmente relevantes en un contexto de fuerte presión sobre los recursos hídricos, donde la calidad del agua subterránea resulta crítica para el abastecimiento humano y agrícola. La conservación de zonas de recarga, barrancos y suelos volcánicos bien desarrollados se revela así, como un componente esencial de las estrategias de gestión sostenible del agua en el archipiélago (Fig. 8).



Fig. 8. Vista del sistema de barrancos profundamente encajados del macizo de Teno desde el mirador de la Cruz de Hilda (Tenerife). La red de barrancos, excavada en potentes materiales volcánicos, actúa como corredor geomorfológico activo para la escorrentía y el transporte de sedimentos durante episodios de lluvias intensas, contribuyendo a la regulación hidrológica natural y a la laminación de avenidas. La elevada permeabilidad de coladas basálticas fracturadas y la presencia de suelos volcánicos favorecen procesos de infiltración, filtración natural y almacenamiento subterráneo, fundamentales para la regulación de la calidad y disponibilidad del agua. El conjunto ilustra el papel de la geodiversidad como infraestructura natural clave para la seguridad hídrica y la resiliencia territorial en ambientes insulares.

Servicios de soporte: la base física sobre la que se desarrollan los ecosistemas y las actividades humanas

Los procesos del suelo, la provisión de hábitats, la función del territorio y del agua como plataformas para usos sociales y económicos, y la capacidad

de enterramiento y almacenamiento del subsuelo conforman un conjunto de servicios fundamentales para la sociedad y el territorio.

Los procesos de meteorización física y geoquímica, junto con la acumulación y transformación de materia orgánica, controlan el desarrollo de los perfiles de suelo y su fertilidad. En contextos volcánicos, la alteración de basaltos, lapillis y cenizas da lugar a suelos jóvenes, a menudo de elevada capacidad de retención hídrica y disponibilidad de nutrientes específicos. En Canarias, los andosoles desarrollados sobre piroclastos y coladas volcánicas –especialmente en islas como Tenerife, La Palma o El Hierro– han constituido la base edáfica de sistemas agrícolas tradicionales, favoreciendo cultivos como la vid, la papa o el plátano en condiciones climáticas limitantes (Arnalds *et al*., 2016).

Un ejemplo singular es el sistema de enarenado volcánico de Lanzarote, donde capas artificiales de lapilli (picón) se utilizan para mejorar la retención de humedad, reducir la evaporación y proteger el suelo frente a la erosión eólica (Fig. 9). Este sistema, directamente dependiente de las propiedades físicas del material volcánico, ha permitido el desarrollo de una agricultura viable en condiciones áridas extremas, ilustrando el papel del suelo como servicio de soporte clave para la producción de alimentos (AEMET, 2012; Fernández-Cabrera *et al*., 2019).



Fig. 9. Sistema de enarenado volcánico de La Geria (Lanzarote). Viñedos cultivados mediante el sistema de enarenado volcánico, en el que una capa de lapilli (picón) cubre el suelo agrícola y actúa como regulador hídrico y térmico, reduciendo la evaporación, favoreciendo la infiltración y protegiendo los horizontes edáficos subyacentes. Este paisaje agrario ejemplifica la interacción directa entre geodiversidad, procesos edáficos activos y conocimiento tradicional, mostrando cómo la base volcánica no solo sustenta, sino que condiciona y posibilita la producción de alimentos en condiciones climáticas áridas.

La geodiversidad sustenta una amplia variedad de hábitats físicos que actúan como soporte directo de la biodiversidad. En Canarias, cuevas y tubos volcánicos –como los del sistema Corona en Lanzarote o los tubos de San Marcos en Tenerife– albergan comunidades faunísticas altamente especializadas, incluyendo especies troglobias endémicas estrechamente ligadas a condiciones microclimáticas estables y a la dinámica hidrogeológica subterránea (Oromí *et al*., 2010) (Fig. 10).



Fig. 10. Cuevas y tubos volcánicos del sistema Corona – Jameos del Agua (Lanzarote). Interior de un tubo volcánico del sistema Corona, caracterizado por condiciones microclimáticas estables y una elevada heterogeneidad estructural que sustentan comunidades de fauna subterránea altamente especializada, incluyendo especies endémicas estrechamente ligadas a la dinámica hidrogeológica del subsuelo volcánico. Estos sistemas constituyen hábitats singulares generados por procesos volcánicos activos y funcionan, al mismo tiempo, como archivos naturales clave para el estudio de la evolución geológica y biológica de las islas, además de poseer un destacado valor educativo y cultural.

Los acantilados costeros y roques emergentes proporcionan hábitats críticos para aves marinas nidificantes, como el petrel de Bulwer o la pardela cenicienta, mientras que los malpaíses volcánicos recientes constituyen hábitats dinámicos donde la colonización biológica temprana y la sucesión ecológica están directamente condicionadas por la estructura, rugosidad y composición del sustrato volcánico. Estos hábitats físicos, generados y mantenidos por procesos geológicos activos, representan un componente esencial del soporte ecológico insular.

La base geológica y geomorfológica del territorio actúa como plataforma para actividades humanas fundamentales. En Canarias, la construcción de asentamientos, infraestructuras portuarias y aeroportuarias, redes viarias y

zonas agrícolas está directamente condicionada por la topografía volcánica, la estabilidad del sustrato y la disponibilidad de plataformas naturales o artificiales. Grandes obras de relleno y acondicionamiento del terreno han permitido el desarrollo de puertos clave para la conectividad insular y atlántica, como los de Las Palmas de Gran Canaria o Santa Cruz de Tenerife, sobre sustratos volcánicos costeros.

Asimismo, la interacción entre la base física volcánica y el medio marino ha favorecido actividades recreativas y deportivas específicas. La configuración del fondo marino, los arrecifes volcánicos y la morfología costera condicionan la generación de oleaje y rompientes que sustentan prácticas como el surf, especialmente en enclaves como La Santa (Lanzarote), El Confital (Gran Canaria) o Punta Blanca (Tenerife). En estos casos, la geodiversidad actúa como soporte material directo de actividades económicas ligadas al ocio y al turismo activo.

El subsuelo constituye un espacio clave para el enterramiento y almacenamiento de materiales, funciones estrechamente ligadas a la geodiversidad. A escala global, formaciones geológicas adecuadas permiten el almacenamiento de agua, hidrocarburos, residuos y carbono. En Canarias, aunque no existen yacimientos de petróleo o gas explotados, el almacenamiento de agua en acuíferos volcánicos representa un servicio crítico. Las coladas basálticas fracturadas, paleosuelos impermeables y estructuras volcánicas superpuestas permiten el almacenamiento subterráneo de grandes volúmenes de agua dulce, fundamentales para el abastecimiento humano y agrícola (Cabrera & Custodio, 2018). El enterramiento de residuos sólidos urbanos y la ubicación de infraestructuras de gestión de desechos también dependen de la naturaleza del sustrato geológico y de su capacidad de aislamiento. Además, los procesos de meteorización acelerada de rocas basálticas han sido propuestos como una vía potencial para la captura y almacenamiento de carbono a largo plazo, un enfoque que despierta creciente interés en regiones volcánicas en el contexto de la mitigación del cambio climático (Matter *et al*., 2016; Kelemen *et al*., 2020).

Servicios de provisión: recursos materiales y energéticos de la geodiversidad

La geodiversidad constituye la base de una amplia gama de servicios de provisión, al suministrar recursos materiales, energéticos y geológicos que sostienen los sistemas productivos, el bienestar humano y el desarrollo económico. Estos servicios incluyen el suministro de agua y alimentos, nutrientes y minerales esenciales, fuentes de energía, materiales de construcción, minerales industriales y productos ornamentales, así como recursos paleontológicos con valor científico y económico. En territorios insulares volcánicos como Canarias, estos servicios adquieren una relevancia

estratégica debido a la limitación espacial, la dependencia exterior y la estrecha relación entre recursos naturales y modelo socioeconómico.

El suministro de agua dulce constituye uno de los servicios de provisión más críticos vinculados a la geodiversidad. En Canarias, los acuíferos volcánicos almacenados en coladas basálticas fracturadas, piroclastos y paleosuelos han sido históricamente la principal fuente de agua para consumo humano, riego y usos agroindustriales. Este recurso ha permitido el desarrollo de cultivos de alta relevancia socioeconómica –plátano, tomate, vid– y de industrias asociadas a la transformación alimentaria.

Asimismo, la composición mineral del agua subterránea y de manantiales volcánicos condiciona su uso como agua mineral con propiedades específicas, aprovechada en embotelladoras locales. La sal marina, obtenida tradicionalmente en salinas costeras asociadas a plataformas volcánicas bajas (como Janubio en Lanzarote, Fuencaliente en La Palma o el Malpaís de Güímar en Tenerife), representa otro ejemplo de recurso alimentario directamente dependiente de la geología y la geomorfología litoral (Fig. 11). Estos espacios combinan funciones productivas, patrimoniales y ecológicas, ligando la provisión de alimentos con valores culturales y paisajísticos.



Fig. 11. Restos de salinas tradicionales sobre coladas basálticas del Malpaís de Güímar (Tenerife), desarrolladas mediante la adaptación directa de la superficie volcánica costera para la captación y evaporación del agua marina. La irregularidad y baja cota de la plataforma lávica condicionan la disposición de los cocederos y tajos, evidenciando el control geomorfológico del litoral volcánico sobre este sistema productivo histórico. El enclave ilustra la integración de la geodiversidad litoral en prácticas tradicionales de provisión de sal, así como su valor cultural, paisajístico y patrimonial, hoy puesto en relación con la interpretación ambiental y el uso público del espacio protegido.

La geodiversidad suministra nutrientes minerales esenciales para el crecimiento humano y vegetal. Los suelos volcánicos canarios, desarrollados a partir de la meteorización de basaltos y piroclastos, son ricos en elementos como potasio, hierro, magnesio y calcio, fundamentales para la fertilidad del suelo y la producción agrícola. Esta base geoquímica explica, en parte, la productividad de determinados sistemas agrarios tradicionales y la calidad nutricional de cultivos locales.

A escala más amplia, minerales extraídos de rocas volcánicas y sedimentarias se emplean como enmiendas agrícolas, fertilizantes y materias primas para la industria química y farmacéutica, subrayando el vínculo entre geodiversidad, salud humana y seguridad alimentaria (UNEP, 2019).

La geodiversidad sustenta una diversidad de recursos energéticos, tanto fósiles como renovables. El archipiélago canario presenta un destacado potencial para energías renovables estrechamente vinculadas a su base física. El volcanismo reciente confiere un interés estratégico a la energía geotérmica, especialmente en islas como Tenerife, La Palma y El Hierro, donde se investigan recursos de media y alta entalpía como complemento a otras fuentes renovables (Pérez *et al*., 2020).

Asimismo, la topografía, la exposición al viento y la configuración costera favorecen el aprovechamiento de la energía eólica y de energías marinas como la undimotriz, directamente condicionadas por la morfología volcánica insular y la dinámica oceánica. Estos recursos refuerzan el papel de la geodiversidad como soporte de la transición energética en contextos insulares dependientes del exterior.

Las rocas y sedimentos proporcionados por la geodiversidad constituyen la base de los materiales de construcción. En Canarias, los basaltos, traquibasaltos, lapillis, arenas volcánicas y áridos han sido y siguen siendo empleados en edificación, infraestructuras viarias, puertos y obras hidráulicas.

El cemento, el hormigón y los aglomerados utilizados en el archipiélago dependen en última instancia de materias primas minerales, lo que refuerza la necesidad de una gestión sostenible de los recursos locales y de la planificación de canteras y zonas de extracción compatible con la conservación del paisaje y la biodiversidad.

La geodiversidad suministra minerales industriales fundamentales para la economía moderna, utilizados en la fabricación de aleaciones metálicas, productos químicos, cosméticos, farmacéuticos y fertilizantes. En el contexto canario, aunque la minería metálica es limitada, los recursos volcánicos han sido empleados para la obtención de abrasivos, materiales aislantes, puzolanas y otros productos industriales, destacando su papel como materias primas estratégicas de menor impacto que la minería metálica convencional (European Commission, 2020).

Determinadas rocas volcánicas, minerales y formaciones geológicas se emplean como productos ornamentales, tanto en construcción como en diseño urbano y artesanía. En Canarias, ignimbritas, basaltos pulidos y piedras volcánicas de distinta textura y color se utilizan en pavimentación, arquitectura tradicional y contemporánea, y elementos patrimoniales, reforzando el vínculo entre geodiversidad, identidad cultural y economía local.

Aunque limitados en extensión, los fósiles y registros paleontológicos presentes en Canarias poseen un alto valor científico, educativo y patrimonial. La comercialización de fósiles, cuando existe, plantea importantes retos éticos y de conservación, ya que estos recursos son irreemplazables y esenciales para la reconstrucción de la historia ambiental y climática del archipiélago. Su gestión responsable se enmarca hoy en políticas de protección del patrimonio paleontológico.

Servicios culturales y de conocimiento

La geodiversidad genera una amplia gama de servicios culturales y de conocimiento que abarcan el ocio, la recreación, la contemplación estética, la inspiración artística, la educación, la identidad territorial y el sentido del lugar. Los paisajes geológicos, lejos de ser meros escenarios, actúan como «infraestructuras culturales» que moldean prácticas sociales, relatos colectivos y economías locales, influyendo en cómo las comunidades perciben y valoran su territorio.

En el archipiélago de Canarias, estos servicios adquieren una relevancia singular debido al carácter volcánico del territorio y a la espectacularidad de sus formas del relieve. El Teide, con su estratovolcán, caldera y extensos campos de lavas, no solo es el punto más elevado de España, sino también un símbolo identitario de alcance regional y nacional, profundamente arraigado en la iconografía y en la percepción colectiva del paisaje. Del mismo modo, el Parque Nacional de Timanfaya, con sus coladas históricas del siglo XVIII, constituye un referente excepcional de paisaje volcánico reciente que conjuga valores estéticos, científicos y educativos, además de ser un polo de atracción turística de primer orden.

Los elementos geológicos canarios sustentan una oferta recreativa y turística fuertemente dependiente de la geodiversidad. Las rutas de senderismo y alta montaña en Las Cañadas del Teide, los itinerarios de volcanes históricos en La Palma (Cumbre Vieja, San Antonio o Teneguía) o los recorridos por malpaíses y campos de lava en Tenerife, Lanzarote y Fuerteventura son ejemplos de cómo la geodiversidad estructura experiencias recreativas ligadas a la contemplación y a la interpretación del territorio. En el litoral, los acantilados y plataformas volcánicas –como Los Gigantes (Tenerife), el norte de La Palma o la costa del Archipiélago Chinijo–

sostienen actividades de observación paisajística, buceo y navegación, reforzando el vínculo entre ocio, economía local y patrimonio geológico.

Aunque la recolección de fósiles no es un rasgo característico de Canarias como destino (por la naturaleza volcánica dominante y por los marcos de protección), el interés por depósitos marinos elevados, playas fósiles y registros cuaternarios existe en contextos educativos y científicos. Precisamente por ello, la gestión del patrimonio geológico recomienda encauzar estas prácticas mediante interpretación, regulación y educación, evitando la extracción no autorizada y priorizando el valor científico y social del registro.

La geodiversidad se integra en el sentido del lugar a través de referencias simbólicas, usos tradicionales y patrimonio construido. En Canarias, roques, calderas, barrancos y lavas forman parte del imaginario cultural y del relato identitario de las islas (Fig. 12). Espacios como Roque Nublo (Gran Canaria) o Roque de los Muchachos (La Palma) han adquirido un papel emblemático como hitos paisajísticos, mientras que determinados enclaves volcánicos y montañosos se asocian a prácticas culturales, toponimia y tradiciones locales.



Fig. 12. Roques de García, Parque Nacional del Teide (Tenerife), con el Roque Cinchado como hito geomorfológico dominante del paisaje volcánico de alta montaña. Estos roques, modelados por la erosión diferencial de antiguos materiales volcánicos, constituyen uno de los referentes visuales y simbólicos más reconocibles de Canarias, inmortalizado en el emblemático billete de mil pesetas y profundamente arraigado en la identidad colectiva del archipiélago. La presencia de senderos y uso público evidencia la integración de estos elementos de la geodiversidad en el imaginario cultural, la experiencia social del paisaje y la construcción histórica del territorio insular.

Asimismo, la arquitectura tradicional en piedra volcánica –muros, bancales, eras, aljibes y caminos empedrados– materializa la relación histórica entre comunidad y recursos geológicos, incorporando la geodiversidad al patrimonio cultural y a la memoria colectiva.

Los paisajes volcánicos canarios han sido fuente de inspiración para la creación artística, desde la fotografía y la pintura hasta la arquitectura y el arte público. El uso estético y funcional de materiales volcánicos en espacios culturales –y la reinterpretación artística del paisaje– ejemplifica cómo la geodiversidad genera contribuciones no materiales vinculadas a la creatividad y la identidad. En Lanzarote, la integración de formas volcánicas y diseño en espacios culturales visitables (por ejemplo, en entornos de jameos, tubos y miradores) evidencia la capacidad de la geodiversidad para catalizar expresiones artísticas y reforzar el atractivo cultural del territorio.

Los servicios culturales también se expresan en el desarrollo social: asociaciones, excursiones interpretativas, voluntariado ambiental, eventos locales y redes educativas. En Canarias, las iniciativas vinculadas a los Geoparques Mundiales UNESCO (El Hierro; Lanzarote y Archipiélago Chinijo) promueven educación, participación y divulgación científica, fortaleciendo la alfabetización geológica y el capital social mediante actividades para residentes y visitantes. Este tipo de gobernanza del territorio, basada en el patrimonio geológico, favorece la cohesión comunitaria y la diversificación económica mediante geoturismo y educación ambiental.

Más allá de su dimensión estética y recreativa, la geodiversidad proporciona servicios de conocimiento fundamentales. Los archivos geológicos –estratigrafías volcánicas, paleosuelos, depósitos sedimentarios, coladas superpuestas, terrazas marinas y formas erosivas– actúan como registros de largo plazo de la historia de la Tierra. En Canarias, el estudio de secuencias volcánicas y paleosuelos ha permitido reconstruir la evolución del archipiélago, los pulsos eruptivos, los episodios de crecimiento y colapso de edificios insulares y las interacciones entre volcanismo, clima y biota a lo largo del tiempo (Carracedo *et al*., 1998). En particular, las terrazas marinas y depósitos litorales elevados aportan información relevante para inferir cambios del nivel del mar y dinámicas costeras pasadas, clave para contextualizar los escenarios actuales de cambio global.

Canarias también tiene un valor destacado para la historia de la investigación en volcanología e ígneas, por ser un archipiélago ampliamente estudiado desde la geología clásica hasta la geocronología y la monitorización moderna. La interpretación de coladas, centros eruptivos, diques, domos y depósitos explosivos ha contribuido a consolidar marcos conceptuales sobre construcción de islas oceánicas, peligros volcánicos y evolución de edificios insulares. Esta dimensión, aunque menos visible para el público general, se traduce en prestigio científico, formación y capacidad técnica local.

Los servicios de conocimiento adquieren una importancia estratégica para la anticipación y gestión de riesgos y para la vigilancia ambiental. El análisis de depósitos eruptivos, colapsos gravitacionales y registros costeros ofrece una base científica para evaluar peligrosidad volcánica, inestabilidad de laderas y exposición a inundación marina. La erupción de Cumbre Vieja (La Palma, 2021) evidenció el valor social de la monitorización y del conocimiento geológico para la gestión de emergencias y la comunicación pública del riesgo. A su vez, la información derivada de terrazas marinas, dinámicas costeras y registros sedimentarios contribuye a mejorar la previsión de impactos asociados al ascenso del nivel del mar y a la intensificación de temporales.

La geodiversidad también sustenta aplicaciones geoforenses: análisis de suelos, sedimentos, minerales y materiales particulados para investigaciones ambientales, gestión de vertidos, trazabilidad de materiales y peritajes. En territorios insulares, donde la presión humana y la sensibilidad ambiental son elevadas, estas herramientas pueden ser relevantes para apoyar procedimientos técnicos y administrativos, reforzando el nexo entre conocimiento geológico y gobernanza del territorio.

Finalmente, la geodiversidad canaria funciona como un aula al aire libre para la formación universitaria y profesional en geología, ecología, riesgos naturales, conservación y turismo sostenible. Los geoparques, centros de interpretación, museos, itinerarios señalizados y programas educativos favorecen la alfabetización científica y generan empleo directo e indirecto en interpretación, investigación aplicada y gestión del patrimonio. Este servicio conecta valores intangibles (conocimiento, identidad) con beneficios socioeconómicos tangibles, especialmente relevantes en economías insulares intensamente dependientes del turismo.

Integración operativa en planificación y políticas públicas

La incorporación efectiva de la geodiversidad en la gestión ambiental requiere el desarrollo de cartografías e inventarios integrados que analicen de manera conjunta variables abióticas, bióticas y socioambientales. Este enfoque supera visiones sectoriales del territorio y permite capturar la complejidad de los sistemas socioecológicos, reconociendo el papel estructurante del sustrato físico en la distribución de hábitats, la provisión de servicios y la generación de riesgos naturales.

En la última década, los avances en teledetección, modelos digitales de elevaciones de alta resolución y sistemas de información geográfica (SIG) han facilitado la derivación de métricas de geodiversidad reproducibles y comparables. Variables como la rugosidad topográfica, la diversidad litológica, la variedad de suelos o la densidad de formas del relieve pueden

integrarse en índices espaciales aplicables a la conservación, la ordenación del territorio y la evaluación ambiental estratégica. Estos desarrollos metodológicos han permitido incorporar la geodiversidad de forma operativa en modelos de biodiversidad, análisis de conectividad ecológica y evaluaciones de vulnerabilidad frente al cambio climático.

En Canarias, este enfoque resulta especialmente pertinente debido a la elevada heterogeneidad geológica y a la fuerte presión sobre el territorio. La integración de cartografía geológica, geomorfológica, edáfica y de usos del suelo ha demostrado su utilidad para identificar áreas con alta capacidad de provisión de servicios de regulación y refugio climático, así como zonas de elevada peligrosidad volcánica, gravitacional o costera. Por ejemplo, en islas como La Palma, Tenerife o El Hierro, la combinación de información sobre coladas históricas, grandes deslizamientos, pendientes y ocupación del suelo permite anticipar conflictos entre expansión urbana, infraestructuras críticas y zonas de riesgo, reforzando la prevención frente a eventos extremos y la gestión post-eruptiva (Fig. 13).

Del mismo modo, en los Geoparques Mundiales de la UNESCO de El Hierro y Lanzarote–Archipiélago Chinijo, los inventarios de patrimonio geológico han servido como base para la planificación del geoturismo y la educación ambiental, articulando conservación y desarrollo local desde una perspectiva territorialmente informada. Estos ejemplos muestran cómo la cartografía de la base física no es un fin en sí mismo, sino una herramienta para orientar decisiones de uso del territorio coherentes con los límites geomorfológicos e hidrológicos de los sistemas insulares.

A escala internacional, enfoques análogos se han aplicado con éxito en contextos diversos. En Escandinavia, la integración de índices de geodiversidad en estrategias de conservación ha servido para identificar áreas prioritarias para la biodiversidad bajo escenarios de cambio climático, siguiendo el enfoque de «*conserving nature's stage*», que prioriza la diversidad geofísica como soporte de la resiliencia ecológica. En regiones montañosas de los Alpes y los Cárpatos, la cartografía integrada de relieve, litología y procesos activos ha mejorado la planificación frente a riesgos de aludes, deslizamientos y torrentes, al tiempo que ha permitido compatibilizar conservación, turismo y usos tradicionales del suelo.

En sistemas costeros, como los del Reino Unido, Países Bajos o Australia, la incorporación de la geodiversidad en la planificación litoral ha resultado clave para diseñar estrategias de adaptación basada en la naturaleza. La identificación de playas, dunas, marismas y plataformas rocosas como elementos funcionales del sistema costero permite reducir la dependencia de infraestructuras duras y aumentar la resiliencia frente al ascenso del nivel del mar y los temporales (Masselink *et al*., 2020). Este tipo de aproximaciones es plenamente transferible a contextos insulares como Canarias, donde la erosión costera y la exposición a temporales representan desafíos crecientes.



Fig. 13. Grandes deslizamientos de El Golfo (El Hierro). Anfiteatro de deslizamiento gravitacional de El Golfo, originado por el colapso parcial del edificio volcánico insular y representativo de los grandes procesos de inestabilidad de laderas en islas volcánicas oceánicas. Estas estructuras controlan de forma decisiva la topografía, condicionan la ocupación y los usos del territorio y actúan como archivos naturales clave para la reconstrucción de la dinámica volcánico-gravitacional insular. La geodiversidad asociada a estos grandes deslizamientos desempeña un papel fundamental en la evaluación de la peligrosidad geológica y en la planificación territorial y la reducción del riesgo. Fuente: Google Maps.

Desde una perspectiva aplicada, integrar la geodiversidad en la ordenación del territorio permite anticipar conflictos de uso, reducir riesgos naturales y reforzar estrategias de adaptación basadas en la naturaleza. Al reconocer explícitamente los condicionantes geológicos y geomorfológicos, se mejora la sostenibilidad de decisiones relacionadas con urbanismo, infraestructuras, conservación y uso de recursos. Este enfoque resulta especialmente relevante en regiones insulares y costeras, donde la disponibilidad de espacio es limitada, la presión sobre el patrimonio natural es elevada y los márgenes de error son reducidos.

En síntesis, la cartografía y el inventario integrados de geodiversidad constituyen una herramienta estratégica para la gestión ambiental contemporánea, capaz de conectar conocimiento científico, planificación territorial y toma de decisiones públicas, y de reforzar la resiliencia de los sistemas socioecológicos frente a escenarios de cambio global.

Geodiversidad, valores y sostenibilidad

Reconocer la pluralidad de valores asociados a la geodiversidad –instrumentales, relacionales e intrínsecos– resulta esencial para evitar su reducción a un mero stock de recursos materiales susceptible de explotación. Los valores instrumentales remiten a los beneficios directos e indirectos que la sociedad obtiene del medio físico –agua, materiales, energía, regulación de riesgos–, mientras que los valores relacionales aluden a los vínculos culturales, identitarios, simbólicos y de sentido del lugar que las personas establecen con los paisajes geológicos. Por su parte, los valores intrínsecos reconocen la legitimidad de conservar la geodiversidad por sí misma, como expresión singular de la historia de la Tierra, con independencia de su utilidad inmediata para los seres humanos.

En Canarias, esta pluralidad de valores se manifiesta de forma especialmente clara. El Teide, los volcanes históricos de Timanfaya o los grandes acantilados costeros no solo generan beneficios económicos asociados al turismo y al ocio, sino que constituyen referentes identitarios profundamente arraigados en la cultura insular y poseen un valor intrínseco como expresiones únicas del volcanismo oceánico. De manera similar, prácticas tradicionales como el enarenado volcánico en Lanzarote ilustran cómo un elemento geológico puede integrar simultáneamente valores instrumentales (mejora de la productividad agrícola), relacionales (conocimiento local, prácticas culturales) e intrínsecos (singularidad patrimonial del paisaje agrícola).

A escala internacional, ejemplos como el Parque Nacional de Uluru-Kata Tjuta en Australia, el Parque Nacional de Yellowstone en Estados Unidos o los paisajes glaciares de Islandia ponen de manifiesto la necesidad de enfoques de valoración que integren dimensiones espirituales, culturales e identitarias junto a consideraciones científicas y económicas. En estos contextos, la gestión de la geodiversidad no puede apoyarse únicamente en criterios de eficiencia económica, sino que requiere procesos deliberativos que incorporen múltiples sistemas de valores, incluidos los de comunidades locales y pueblos indígenas (Pascual *et al*., 2017).

La valoración monetaria de la geodiversidad y de sus contribuciones puede ser una herramienta útil para apoyar la decisión pública, visibilizar externalidades y comparar alternativas en contextos de planificación y evaluación ambiental. Sin embargo, su aplicación debe realizarse con cautela y de forma complementaria a otros enfoques, evitando reducir valores complejos a métricas únicamente económicas. Marcos de evaluación deliberativos y multicriterio, que integren conocimiento científico, percepciones sociales y consideraciones éticas, ofrecen una base más adecuada para la toma de decisiones en territorios con alta complejidad socioecológica.

En este sentido, la gestión de la geodiversidad se sitúa en el núcleo de una agenda global de sostenibilidad, estrechamente vinculada a la conservación de la biodiversidad, la acción climática, la reducción del riesgo de desastres y el desarrollo territorial equitativo. La diversidad geológica y geomorfológica proporciona opciones de adaptación frente al cambio climático, sustenta infraestructuras naturales de larga duración y reduce la exposición a peligros naturales, contribuyendo de manera transversal a múltiples objetivos de sostenibilidad (IPBES, 2019; Gray *et al*., 2023).

En territorios insulares y costeros como Canarias, donde los recursos son limitados, la presión antrópica es elevada y los riesgos naturales están amplificados, integrar explícitamente los valores de la geodiversidad en la planificación territorial y en las políticas públicas resulta particularmente crucial. Reconocer estos valores no solo fortalece la conservación del patrimonio geológico, sino que también favorece modelos de desarrollo más inclusivos, resilientes y coherentes con los límites físicos del territorio.

En conjunto, avanzar hacia una gestión sostenible de la geodiversidad implica asumir que el medio físico no es únicamente un soporte pasivo del desarrollo, sino un componente activo de la naturaleza que contribuye al bienestar humano. Incorporar la pluralidad de valores asociados a la geodiversidad permite enriquecer la toma de decisiones, reducir conflictos socioambientales y reforzar la conexión entre conservación de la naturaleza y justicia territorial en un contexto de cambio global.

Consideraciones finales

El recorrido conceptual y empírico desarrollado a lo largo del texto confirma que la geodiversidad no es un «decorado» sobre el que se asienta la biodiversidad, sino un componente activo que estructura la heterogeneidad ambiental, modula los ciclos biogeoquímicos y condiciona la resiliencia de los ecosistemas.

Esta idea, coherente con la definición sistémica de ecosistema, se refuerza al constatar que variables geofísicas como la diversidad litológica, la complejidad del relieve o la variabilidad edáfica aportan información valiosa y mejoran la explicación de los patrones de riqueza y recambio de especies, especialmente a escalas locales y regionales (Hjort *et al*., 2012, 2015; Bailey *et al*., 2017, 2018). En otras palabras: donde el territorio es físicamente diverso, suelen multiplicarse los nichos, los microclimas y los gradientes de suelos y humedad que permiten sostener comunidades biológicas más variadas, aunque el efecto dependa del grupo taxonómico, sus rasgos funcionales y la escala de análisis.

Desde el punto de vista de los beneficios para las sociedades, el texto muestra que integrar la geodiversidad en el marco de los servicios ecosistémicos y, más ampliamente, en las contribuciones de la naturaleza a

las personas (NCP) permite visibilizar aportes sistemáticamente infrarrepresentados cuando se trabaja solo desde la biodiversidad: regulación de riesgos, dinámica costera, recarga y almacenamiento de agua subterránea, formación y conservación de suelos, soporte físico y geotécnico, y provisión de materiales, además de valores culturales, identitarios y de conocimiento. Esta perspectiva evita reduccionismos y ayuda a entender que los beneficios no son simples «flujos» naturales, sino resultados de coproducción entre procesos abióticos, biota y sistemas sociales, con mediación de instituciones, prácticas y valores. Por ello, la sostenibilidad exige reconocer una pluralidad de valores –instrumentales, relacionales e intrínsecos– y utilizar la valoración monetaria solo como apoyo, complementándola con enfoques deliberativos y multicriterio que integren dimensiones culturales y éticas.

A partir de esta base, la conclusión aplicada es clara: la incorporación real de la geodiversidad a la gestión ambiental no se logra con declaraciones generales, sino mediante instrumentos técnicos y normativos que la traduzcan en decisiones territoriales. Ello implica desarrollar inventarios y cartografías integradas (abióticas, bióticas y socioambientales), apoyarse en teledetección y SIG para derivar métricas de geodiversidad y capas funcionales (zonas de recarga, corredores torrenciales, unidades litorales disipativas, áreas de procesos activos), e introducirlas de manera explícita en la planificación, la evaluación ambiental estratégica y la gestión del riesgo. Integrar la geodiversidad en la ordenación del territorio permite anticipar conflictos de uso, evitar inversiones de alto riesgo (por exposición a inundaciones, erosión, deslizamientos o peligros volcánicos), y reforzar estrategias de adaptación basada en la naturaleza, priorizando soluciones que trabajen con la dinámica geomorfológica e hidrológica, en lugar de rigidizarla. En un contexto de cambio global, esta integración no es un «extra», sino un requisito de coherencia: sin base física, ni los ecosistemas ni las políticas de conservación y adaptación pueden sostenerse a largo plazo.

El caso de Canarias ilustra de forma especialmente elocuente estas conclusiones generales. En un archipiélago volcánico, la diversidad de edades, coladas, edificios eruptivos, grandes deslizamientos y formas costeras produce contrastes ambientales muy marcados en distancias cortas, con efectos directos sobre los hábitats, el endemismo y la organización de los ecosistemas. Pero, además, Canarias muestra cómo la geodiversidad se convierte simultáneamente en infraestructura natural de regulación y en patrimonio cultural. La regulación hídrica depende críticamente de la estructura y permeabilidad del sustrato volcánico, que controla infiltración, recarga y almacenamiento de acuíferos y ha sustentado históricamente la agricultura y los asentamientos mediante galerías y manantiales (Alley *et al*., 2018). La costa volcánica –playas negras, plataformas rocosas, acantilados– actúa como primera línea de disipación del oleaje y, por tanto, como componente clave frente a erosión e inundación marina en un escenario de

temporales y ascenso del nivel del mar. Y el territorio insular, atravesado por barrancos de respuesta rápida, pone de relieve la importancia de conservar corredores geomorfológicos funcionales para reducir el riesgo de avenidas y daños, evitando ocupaciones en zonas de flujo preferente. A su vez, los paisajes del Teide, Timanfaya o los tubos volcánicos como Jameos del Agua muestran cómo la geodiversidad sostiene servicios culturales y de conocimiento –identidad, educación, ciencia, turismo–, y por qué los Geoparques Mundiales de la UNESCO (El Hierro; Lanzarote y Archipiélago Chinijo) son ejemplos de gobernanza que vincula conservación con desarrollo local basado en educación y geoturismo sostenible (Gray, 2018).

Por todo ello, la conclusión –válida para cualquier territorio y, particularmente, aplicable en Canarias– es que una sostenibilidad efectiva requiere hacer explícita la geodiversidad en la toma de decisiones, pasando de su reconocimiento conceptual a su implementación práctica. Esto supone: (a) que la planificación territorial incorpore una lectura por procesos y capacidades del territorio (recarga, dinámica litoral, torrencialidad, inestabilidad de laderas, peligrosidad volcánica) además de por usos; (b) que la evaluación ambiental examine de forma verificable impactos sobre suelos, hidrología subterránea, dinámica costera y patrimonio geológico; (c) que la adaptación climática priorice soluciones basadas en la naturaleza que mantengan la funcionalidad geomorfológica; y (d) que la gobernanza integre la pluralidad de bienes y servicios que ofrece la geodiversidad –materiales, reguladores, culturales y de conocimiento– para evitar la infravaloración sistemática del medio físico. En última instancia, debemos asegurar que conservar y gestionar la geodiversidad adecuadamente es conservar la «infraestructura» que hace posible la biodiversidad y el bienestar humano: una condición necesaria para que los territorios sean más resilientes, para que las decisiones públicas sean más preventivas y en síntesis para conseguir un desarrollo territorial y humano más equitativo y duradero.

En noviembre de 2025, el Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias dedicó a la temática de la geodiversidad el ciclo de conferencias que bajo la denominación de Semana Científica organiza anualmente para homenajear al profesor Telesforo Bravo, y proponía como principal objetivo poner en valor y divulgar el patrimonio geológico (Afonso-Carrillo, 2026). En el presente capítulo hemos recopilado las principales ideas que presentamos en dichas jornadas.

Bibliografía

AEMET (2012). *Climatología de Lanzarote y Fuerteventura*. Madrid, España: Agencia Estatal de Meteorología. 220 pp.

AFONSO-CARRILLO, J. (Ed.) (2026). *Patrimonio Geológico. La memoria de la Tierra*. XXI Semana Científica Telesforo Bravo, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias, Puerto de la Cruz.

ALAHUHTA, J., J. HEINO, M. LUOTO & M. TOIVANEN (2018). Global patterns in the metacommunity structuring of lake macrophytes. *Ecology Letters* 21(9): 1274-1284. https://doi.org/10.1111/ele.13114

ALAHUHTA, J., M. TOIVANEN, J. HJORT & J. HEINO (2020). Environmental heterogeneity, geodiversity and biodiversity in freshwater ecosystems. *Freshwater Biology* 65(5): 935-947. https://doi.org/10.1111/fwb.13440

ALBANO, P.G., M. RANDONE, G. CHIMIENTI *et al.* (2021). Are climate-driven range shifts shaped by bioclimate, orography, or geology? *Global Ecology and Biogeography* 30(2): 329-342. https://doi.org/10.1111/geb.13221

ALLEY, W.M., T.E. REILLY & O.L. FRANKE (2018). *Sustainability of groundwater resources* (U.S. Geological Survey Circular 1186; v + 79 pp.). Reston, VA, Estados Unidos: U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/cir1186

ARNALDS, O., F. BARTOLI, P. BUURMAN *et al.* (2016). Soils of volcanic regions. *Geoderma* 282: 1-3. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.004

BAILEY, J.J., D.S. BOYD & R. FIELD (2017). Modelling native and alien vascular plant species richness: At which scales is geodiversity most relevant? *Global Ecology and Biogeography* 26(7): 763-776. https://doi.org/10.1111/geb.12574

BAILEY, J.J., D.S. BOYD, R. FIELD & R.J. WHITTAKER (2018). Biogeographical explanations for the diversity gradient of woody plants. *Journal of Biogeography* 45(6): 1205-1216. https://doi.org/10.1111/jbi.13179

BAILEY, J.J., D.S. BOYD, J. HJORT, C.P. LAVERS & R. FIELD (2018). Modelling native and alien species richness using geodiversity measures and species distribution models. *Global Ecology and Biogeography* 27(6): 664-675. https://doi.org/10.1111/geb.12732

BEIER, P., M.L. HUNTER & M. ANDERSON (2015). Conserving nature's stage. *Conservation Biology* 29(3): 613-617. https://doi.org/10.1111/cobi.12467

CABRERA, M.C. & E. CUSTODIO (2018). Groundwater resources in volcanic islands: Hydrological processes, water balance and sustainability. *Journal of Hydrology* 556: 373-394. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.032

CARRACEDO, J.C., S. DAY, H. GUILLOU & F.J. PÉREZ TORRADO (1998). Volcanic collapse structures in the Canary Islands: Geological significance and relation to structural evolution. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 83(1-2): 1-22. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00007-1

CARRACEDO, J.C., S. DAY, H. GUILLOU, E. RODRÍGUEZ BADIOLA, J.A. CANAS & F.J. PÉREZ TORRADO (1998). Hotspot volcanism close to a passive continental margin: The Canary Islands. *Geological Magazine* 135(5): 591-604. https://doi.org/10.1017/S0016756898001447

CARRACEDO, J.C. & V.R. TROLL (2016). *The Geology of the Canary Islands* (1st ed.; 636 pp.). Amsterdam, Países Bajos: Elsevier. ISBN 978-0-12-809663-5.

CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY (1992). *Convention on Biological Diversity* (opened for signature 5 June 1992; entered into force 29 Dec 1993). Montreal, Canadá: United Nations Environment Programme. https://www.cbd.int/convention/text/

COSTANZA, R., R. D'ARGE, R. DE GROOT, S. FARBER, M. GRASSO, B. HANNON, K. LIMBURG, S. NAEEM, R.V. O'NEILL, J. PARUELO, R.G. RASKIN, P. SUTTON & M.

VAN DEN BELT (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260. https://doi.org/10.1038/387253a0

CUSTODIO, E. (2007). Groundwater in volcanic islands: The Canary Islands example. *Ground Water* 45(4): 504-515. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00330.x

DE GROOT, R.S., R. ALKEMADE, L. BRAAT, L. HEIN & L. WILLEMEN (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity* 7(3): 260-272. https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006

DÍAZ, E., L. SÁEZ & Á. GARCÍA-CORTÉS (2018). Integrating geoheritage into environmental assessment and land-use planning: Conceptual advances and applied implications. *Geoheritage* 10(3): 343-361. https://doi.org/10.1007/s12371-017-0261-0

DÍAZ, S., U. PASCUAL, M. STENSEKE, B. MARTÍN-LÓPEZ, R.T. WATSON, Z. MOLNÁR, R. HILL, K.M.A. CHAN, I.A. BASTE, K.A. BRAUMAN, S. POLASKY, A. CHURCH, M. LONSDALE, A. LARIGAUDERIE, P.W. LEADLEY, A.P.E. VAN OUDENHOVEN, F. VAN DER PLAAT, M. SCHRÖTER *et al.* (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science* 359(6373): 270-272. https://doi.org/10.1126/science.aap8826

DOBROWSKI, S.Z. (2011). A climatic basis for microrefugia: The influence of terrain on climate. *Global Change Biology* 17(2): 1022-1035. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02263.x

EMERSON, B.C. & R.G. GILLESPIE (2008). Phylogenetic analysis of island radiations. *Trends in Ecology & Evolution* 23(11): 619-627. https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.07.001

FERNÁNDEZ-CABRERA, E., A. RODRÍGUEZ & C. HERNÁNDEZ (2019). Traditional agricultural systems in arid volcanic landscapes. *Agricultural Systems* 176: 102669.

FERNÁNDEZ-LUGO, S., L. DE NASCIMENTO, R. OTTO, *et al.* (2013). Old volcanoes and young forests. *Journal of Biogeography* 40(2): 273-284.

FERNÁNDEZ-PALACIOS, J.M., L. DE NASCIMENTO, R. OTTO, J.D. DELGADO, E. GARCÍA-DEL-REY, J.R. ARÉVALO & R.J. WHITTAKER (2016). A reconstruction of Palaeo-Macaronesia, with particular reference to the long-term biogeography of the Atlantic island laurel forests. *Journal of Biogeography* 43(5): 853-864. https://doi.org/10.1111/jbi.12655

FOX, N., D. VINER & A. HILL (2020). Incorporating geodiversity into ecosystem service assessments: A review. *Ecosystem Services* 44: 101122. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101122

GORDON, J.E. & H.F. BARRON (2013). Valuing geodiversity and geoconservation: Developing a more strategic ecosystem approach. *Scottish Journal of Geology* 49(1): 1-15. https://doi.org/10.1144/sjg2011-465

GRAY, M. (2013). *Geodiversity: Valuing and conserving abiotic nature* (2nd ed.; 512 pp.). Chichester, Reino Unido: John Wiley & Sons.

GRAY, M. (2018). The confused position of the geosciences within the natural capital and ecosystem services debates. *Ecosystem Services* 34: 106-112. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.10.006

GRAY, M., J.E. GORDON & E.J. BROWN (2013). Geodiversity and the ecosystem approach: The contribution of geoscience in delivering integrated environmental management. *Proceedings of the Geologists' Association* 124(4): 659-673. https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2013.01.003

GRAY, M., J.E. GORDON & E.J. BROWN (2023). Geodiversity, geoheritage and geoconservation: Implications for sustainable development. *Geoheritage* 15: 1-15.

HAINES-YOUNG, R. & M. POTSCHIN-YOUNG (2018). Revision of the Common International Classification of Ecosystem Services (CICES V5.1): A policy brief (15 pp.). *One Ecosystem* 3, e27108. https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108

HJORT, J., R.K. HEIKKINEN & M. LUOTO (2012). Inclusion of explicit measures of geodiversity improves biodiversity models in a boreal landscape. *Biodiversity and Conservation* 21(13): 3487-3506. https://doi.org/10.1007/s10531-012-0376-1

HJORT, J., J.E. GORDON, M. GRAY & M.L. HUNTER (2015). Why geodiversity matters in valuing nature's stage. *Conservation Biology* 29(3): 630-639. https://doi.org/10.1111/cobi.12510

ILLERA, J.C., L.G. SPURGIN, E. RODRÍGUEZ-EXPÓSITO, M. NOGALES & B.C. EMERSON (2012). What are the roles of geological history and ecological processes in shaping genetic diversity in island populations? *Molecular Ecology* 21(18): 4446-4462. https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05667.x

IPBES (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services* (xlviii + 1148 pp.). Bonn, Alemania: IPBES Secretariat. https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673

IRL, S.D.H., W.A. OBERMEIER, C. BEIERKUHNLEIN & M.J. STEINBAUER (2015). Climate vs. topography – Spatial patterns of plant species richness and endemism on a high-elevation island. *Journal of Biogeography* 42(10): 1895-1906. https://doi.org/10.1111/jbi.12548

KELEMEN, P.B., N. MCQUEEN, J. WILCOX *et al.* (2020). Engineered carbon mineralization. *Energy & Environmental Science* 13: 3844-3873.

LAWLER, J.J., D.D. ACKERLY, C.M. ALBANO, M.G. ANDERSON, S.Z. DOBROWSKI, J.L. GILL, N.E. HELLER, R.L. PRESSEY, E.W. SANDERSON & S.B. WEISS (2015). The theory behind, and the challenges of, conserving nature's stage in a time of rapid change. *Conservation Biology* 29(3): 618-629. https://doi.org/10.1111/cobi.12411

LEEMPOEL, K., C. PARISOD, C. GEISER, L. DAPRÀ, P. VITTOZ & S. JOOST (2015). Very high-resolution digital elevation models: Are multi-scale derived variables ecologically relevant? *Methods in Ecology and Evolution* 6(12): 1373-1383. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12427

MASSELINK, G. & W.R. GEHRELS (2014). *Coastal environments and global change* (vii + 438 pp.). Chichester, West Sussex (Reino Unido) / Hoboken, NJ (EE.UU.): Wiley (co-publication AGU–Wiley). ISBN 978-0-470-65660-0.

MASSELINK, G., T. SCOTT, T. POATE, P. RUSSELL, R. DAVIDSON ARNOTT & D. CONLEY (2020). The role of morphology and sediment in coastal resilience. *Earth Surface Processes and Landforms* 45(3): 811-830. https://doi.org/10.1002/esp.4774

MARTÍ, J., A. GEYER, G. AGUIRRE-DÍAZ *et al.* (2013). Volcanic fields and associated hazards. In Fagents, S.A., T.K.P. Gregg & R.M.C. Lopes (Eds.), *Modeling volcanic processes: The physics and mathematics of volcanism* (pp. 87-108). Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.

MATTER, J.M., M. STUTE, S.Ó. SNÆBJÖRNSDOTTIR *et al.* (2016). Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic CO_2 emissions. *Science* 352(6291): 1312-1314.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis* (137 pp.). Washington, DC, Estados Unidos: Island Press. ISBN 1-59726-040-1.

ODUM, E.P. (1953). *Fundamentals of ecology* (384 pp.). Philadelphia, PA, Estados Unidos: W.B. Saunders.

OROMÍ, P., J.L. MARTÍN, H. LÓPEZ & I. IZQUIERDO (2010). Biodiversity and conservation of lava tubes in the Canary Islands. *Subterranean Biology* 7: 1-23.

PARKS, S.A., S.Z. DOBROWSKI & J.T. ABATZOGLOU (2020). Human-caused climate change creates novel fire weather in the western United States. *Nature Climate Change* 10: 1131-1137.

PASCUAL, U., P. BALVANERA, S. DÍAZ, G. PATAKI, E. ROTH, M. STENSEKE, R.T. WATSON, E.B. DESSANE, M. ISLAR, E. KELEMEN *et al.* (2017). Valuing nature's contributions to people: The IPBES approach. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 26-27: 7-16. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.12.006

PÉREZ, N.M., G. MELIÁN, & P.A. HERNÁNDEZ (2020). Geothermal resources of the Canary Islands: Current status and future potential. *Renewable Energy* 147: 119-134. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.040

READ, Q.D., P.L. ZARNETSKE, S. RECORD, K.M. DAHLIN, J. COSTANZA, A.O. FINLEY, K.D. GADDIS, J.M. GRADY, M.L. HOBI, A.M. LATIMER, A.M. WILSON & E.B. DAVIS (2020). Beyond counts and averages: Relating geodiversity to dimensions of biodiversity. *Global Ecology and Biogeography* 29(4): 696-710. https:// doi.org/ 10.1111/geb.13061

SCHERRER, D. & C. KÖRNER (2011). Topographically controlled thermal habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming. *Journal of Biogeography* 38(2): 406-416. https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02407.x

STEIN, A., K. GERSTNER & H. KREFT (2014). Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales. *Ecology Letters* 17(7): 866-880. https://doi.org/10.1111/ele.12277

TANSLEY, A.G. (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology* 16(3): 284-307. https://doi.org/10.2307/1930070

TOIVANEN, M., J., ALAHUHTA & J. HJORT (2019). Geodiversity–biodiversity relationships in freshwater ecosystems. *Ecological Indicators* 100: 237-247.

TUKIAINEN, H., M. TOIVANEN, & T. MALINIEMI (2023). Geodiversity as a driver of biodiversity under climate change. *Global Change Biology* 29(1): 1-14. https:// doi.org/10.1111/gcb.16510

UNESCO (2016). *UNESCO Global Geoparks: Celebrating Earth heritage, sustaining local communities* (brochure; 20 pp.). Paris, Francia: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

UNITED NATIONS (2021). *System of Environmental-Economic Accounting–Ecosystem Accounting (SEEA EA)* (441 pp.) (White cover, pre-edited text). New York, NY, Estados Unidos: United Nations. Disponible en https://seea.un.org/ecosystem-accounting.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2019). *Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources* (188 pp.). Geneva, Suiza: UNEP/GRID-Geneva. https://unepgrid.ch/storage/app/media/documents/Sand_and_sustainability_UNEP_2019.pdf

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2022). *Sand and sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis* (90 pp.). Geneva, Suiza: UNEP/GRID-Geneva. https://unepgrid.ch/storage/app/media/Publications/2022sandandsustainabilityreportfinal.pdf

WARD, J.V., K. TOCKNER, D.B. ARSCOTT, & C. CLARET (1999). Riverine landscape diversity. *Freshwater Biology* 47(4): 517-539. https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1999.00293.x

WHITTAKER, R.J. & J.M. FERNÁNDEZ-PALACIOS (2007). *Island biogeography: Ecology, evolution, and conservation* (2nd ed.; 401 pp.). Oxford, Reino Unido: Oxford University Press.

WHITTAKER, R.J., J.M. FERNÁNDEZ-PALACIOS, T.J. MATTHEWS, M.K. BORREGAARD & K.A. TRIANTIS (2017). Island biogeography: Taking the long view. *Journal of Biogeography* 44(5): 963-977. https://doi.org/10.1111/jbi.12994

WHITTAKER, R.J., K.A. TRIANTIS & R.J. LADLE (2008). A general dynamic theory of oceanic island biogeography. *Journal of Biogeography* 35(6): 977-994. https://doi. org/10.1111/j.1365-2699.2008.01892.x

ZAKŠEK, K., K. OŠTIR & Ž. KOKALJ (2011). Sky-view factor as a relief visualization technique. *Remote Sensing* 3(2): 398-415. https://doi.org/10.3390/rs3020398

ZARNETSKE, P.L., Q.D. READ, S. RECORD, K.D. GADDIS & S.A. SCHNITZER (2019). Towards connecting biodiversity and geodiversity across scales with satellite remote sensing. *Global Ecology and Biogeography* 28(5): 548-556. https://doi.org/10.1111/geb.12887