

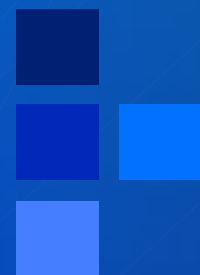
N.º58

MARZO DE 2025

DOCUMENTOS

DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA

UNIVERSIDAD DEL NORTE



BIODIVERSIDAD PARA UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN ALIMENTARIO CLIMÁTICAMENTE RESILIENTE



Vigilada Mineducación

Andrés Vargas Pérez
José Luis Ramos Ruiz

Biodiversidad Para Un Sistema De Producción Alimentario Climáticamente Resiliente.

Andrés Vargas Pérez
José Luis Ramos Ruiz

Serie Documentos, 58

Marzo de 2025

La serie *Documentos* del Departamento de Economía de la Universidad del Norte circula con el fin de difundir y promover las investigaciones realizadas en Uninorte, y también aquel resultado de la colaboración con académicos e investigadores vinculados a otras instituciones. Los artículos no han sido evaluados por pares, ni están sujetos a ningún tipo de evaluación formal por parte del equipo editorial.

Se autoriza la reproducción parcial de su contenido siempre y cuando se cite la fuente, y se solicite autorización a sus autores. Los conceptos expresados son de responsabilidad exclusiva de sus autores, y no representan la visión de la Universidad del Norte.

BIODIVERSIDAD PARA UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN ALIMENTARIO CLIMÁTICAMENTE RESILIENTE

ANDRÉS VARGAS¹, JOSÉ LUIS RAMOS¹

Resumen

La producción de alimentos es una de las principales causas de la pérdida de biodiversidad, emisión de gases efecto invernadero, así como de otros impactos negativos ambientalmente. A su vez, la producción de alimentos depende estrechamente de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que de ella se derivan. La sostenibilidad, entendida como la capacidad de producir alimentos en suficiente cantidad, calidad, y variedad, para garantizar la seguridad alimentaria de la población, se soporta en la salud de los ecosistemas. Esta capacidad, está siendo disminuida tanto por las prácticas agrícolas como por los efectos del cambio climático. La variabilidad climática, los eventos, extremos, las modificaciones de los patrones estacionales, y los cambios de largo plazo en temperatura y precipitaciones, impactan de manera negativa la producción de alimentos, y por lo tanto las condiciones de vida de los productores, y comprometen la seguridad alimentaria de la población. En este sentido, el sistema de producción alimentario requiere transformarse con miras a alcanzar los objetivos simultáneos de protección de la biodiversidad, mitigación y adaptación al cambio climático, y seguridad alimentaria. En este documento se argumenta que la mayor integración de la biodiversidad en los sistemas de producción agrícola los hace más resilientes al cambio climático. Este análisis es relevante para Colombia toda vez que en ella convergen la ruralidad, elevados índices de pobreza e inseguridad alimentaria, un proceso de degradación ambiental acelerado, y alta vulnerabilidad al cambio climático.

INTRODUCCIÓN

La producción de alimentos es un motor directo de degradación de ecosistemas, emisión y de gases efecto invernadero y pérdida de biodiversidad. Se estima que contribuye con el 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), 70% del uso de agua fresca y el 80% de la conversión de tierra para la agricultura, constituyendo así en el principal motor de pérdida de biodiversidad [1] En Colombia, alrededor del 58% de las emisiones de GEI provienen de la agricultura, la silvicultura y otros usos del suelo, AFOLU[2]. Se estima además que al menos el 34% de los ecosistemas naturales del país han sido transformados, en buena medida por procesos de cambio de uso del suelo asociados a las actividades agrícolas y ganaderas[3], que han transformado bosques en praderas simples, afectando negativamente la diversidad biológica. En este sentido, se estima que aproximadamente 2.8 millones de hectáreas están dedicadas a cultivos industriales como palma de aceite y caña de azúcar, lo que representa casi la mitad del área total utilizada por el sector agrícola.²

La biodiversidad, a su vez, está estrechamente relacionada con la agricultura. Es fundamental para mantener la producción agropecuaria en el tiempo. En los sistemas productivos, la biodiversidad contribuye más allá de la provisión de fibras, alimentos y combustibles. El reciclaje de nutrientes, control del microclima local, regulación de procesos hidrológicos locales, y la regulación de la abundancia de organismos no deseados, son algunas de las contribuciones más importantes. Al ser

¹ Departamento de Economía, Universidad del Norte

² <https://www.elespectador.com/ambiente/bibo/poca-biodiversidad-el-negativo-legado-que-dejo-el-cambio-uso-del-suelo-en-colombia/> Cifra de la Encuesta Nacional de Agricultura.

estos procesos principalmente biológicos, su persistencia depende del mantenimiento de la diversidad biológica [4]. Sin embargo, la búsqueda de eficiencia productiva ha llevado a sistemas de producción basados en el monocultivo, que, al simplificar biológicamente los ecosistemas, terminan generando una dependencia constante de herbicidas y pesticidas para el control de plagas, y de fertilizantes para mantener la disponibilidad de nutrientes. El uso de estas sustancias a su vez es una fuente significativa de contaminación del suelo y los cuerpos de agua.

A esto deben añadirse el efecto del cambio climático sobre los sistemas productivos. Mayor variabilidad climática, modificación de los patrones estacionales, incremento en la frecuencia de eventos extremos, ascenso de la temperatura, entre otros, están impactando significativamente la producción agrícola, e incluso comprometiendo el ingreso de las personas y la seguridad alimentaria en algunas regiones. En un estudio reciente [5], se estima que los hogares presentan reducción en sus ingresos debido al cambio climático, los cuales pueden resultar mayores a las variaciones negativas del PIB. Específicamente, *un choque en los alimentos sin procesar implica pérdidas en el ingreso hasta del 20%, especialmente en escenarios de no adaptación.*

Este cambio a su vez exacerba los daños por pestes y modifican la distribución espacial de esta misma y de los patógenos. Así, la simplificación de ecosistemas se traduce en una creciente vulnerabilidad al cambio climático. Si bien los impactos del cambio climático son amplios, complejos, espacial y geográficamente heterogéneos, e influenciados por condiciones económica y sociales preexistentes, puede decirse que estos tienden a ser más fuertes en regiones tropicales proclives a la escasez de agua[6], y que al darse en entornos de alta incidencia de pobreza y debilidad institucional pueden terminar amplificando el conflicto social y los procesos migratorios [7].

Las evidencias a nivel de país manifiestan que el cambio climático está intensificando problemas sociales y económicos en Colombia, especialmente en regiones tropicales vulnerables a la escasez de agua³. De acuerdo con estudios realizados por INVEMAR - IDEAM, las zonas costeras e insulares colombianas son altamente vulnerables a los impactos del cambio climático por las siguientes razones:[a]Amenaza de inundación sobre 4.9% de las áreas de cultivos y pastos de la zona costera del Caribe continental, alta vulnerabilidad de la mayoría de las áreas ocupadas por la industria manufacturera y el 44.8% de la malla vial terrestre del mismo litoral; [b]Inundación del 17% del territorio de la isla de San Andrés, afectando vías principales, aeropuerto, infraestructura hotelera y la población ubicada cerca de la zona costera. Por otro lado, se tiene previsto el incremento en las precipitaciones del 15% para el año 2050 y del 20% para el año 2080 para la zona del Archipiélago de San Andrés - Providencia y Santa Catalina, lo cual vulneraría el sistema de saneamiento básico con que cuenta la Isla de San Andrés.

Todo lo anterior llama a una transformación de los sistemas de producción alimentarios. Como se argumentará, dicha transformación trasciende la aplicación de mejoras técnicas y nuevas tecnologías, y debe basarse en una integración más estrecha y profunda de la biodiversidad a fin de hacerlos más resilientes al cambio climático.

³ Tomado de internet: <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/cambio-climatico/que-es-cambio-climatico/impacto-del-cambio-climatico-en-colombia>.

Delimitación del sistema

El sistema de producción de alimentos abarca un grupo de actores y sus actividades de producción de alimentos que se originan en la agricultura, ganadería y pesca, así como el entorno amplio económico, social, ambiental, e institucional en el que dichas actividades se desarrollan. Se afirma que este sistema es sostenible si contribuye a la seguridad alimentaria de tal manera que preserva las bases económicas, sociales, culturales, y ecológicas para generar seguridad alimentaria a lo largo del tiempo. La transformación del sistema se entiende con los cambios fundamentales necesarios para el logro de objetivos socialmente deseables, como por ejemplo la neutralidad climática y la conservación de la biodiversidad. La transformación implica tanto transición como evolución, siendo la primera el movimiento de un estado a otro y la segunda el proceso de cambio[8]. Para efectos prácticos, la definición del sistema requiere su delimitación, la identificación de los bloques constitutivos y las relaciones entre ellos, y la identificación de los otros sistemas en los que está anidado.

Así, la delimitación puede basarse en características biofísicas, jurisdicciones político-administrativas, periodos temporales, divisiones culturales, entre otros[9]. Este es un reto tanto práctico como epistemológico. Desde el punto de vista práctico la definición del sistema debe ser adecuado para el propósito del estudio, y lo suficientemente preciso para la definición de los dominios de política pública. En el ámbito epistemológico tenemos la subjetividad en la demarcación, por un lado, y los múltiples significados que puede un mismo conjunto de observaciones. En la medida que la producción de alimentos es fundamentalmente la acción humana aplicada al crecimiento de plantas y animales en un espacio físico determinado, y que es a partir de estas acciones que se configura la producción agropecuaria y su interacción con la naturaleza, la intencionalidad se convierte en el criterio primario para acotar el sistema [10]. De esta manera, el sistema de producción alimentario está configurado por el espacio físico dedicado a la producción, los otros espacios con los que el espacio productivo interactúa - como un bosque ripario adyacente - así como por los recursos, infraestructura, mercados, instituciones, personas y comunidades dedicadas a producir alimentos. Al espacio físico directamente dedicado a la producción se le puede llamar un agroecosistema, toda vez que es un espacio territorial manejado con la intención de producir alimentos.

La producción de alimentos debe considerarse a su vez como un elemento constitutivo del sistema alimentario como tal, y por lo tanto en relación estrecha con las actividades de procesamiento, distribución, comercialización y consumo de alimentos, las cuales son llevadas a cabo por diversos actores cuyas decisiones están influenciadas por aspectos ambientales, sociales, de política pública, tecnológicos, de mercado, así como por choques y estrés[11]. De todo esto se obtienen unos resultados sociales, económicos y ambientales que pueden ser o no socialmente deseables.

Se considera entonces que el sistema de producción de alimentos opera a diferentes escalas. Si bien esta escala puede ir desde lo local hasta lo global, es clave tener en cuenta hasta donde alcanzan a tener efecto las acciones locales. Para lo que acá nos interesa, las acciones locales tienen un impacto directo en la configuración del paisaje agrícola a escala regional. Esta relación es clave, pues la biodiversidad interactúa con los sistemas de producción a diferentes niveles: desde el predio individual hasta el paisaje.

Relación biodiversidad sistema alimentario

De acuerdo con lo anterior, es posible organizar analíticamente la relación biodiversidad producción de alimentos a partir de la diversidad genética, de especies usadas en la producción, de escala de paisaje, y la asociada [12]. A nivel genético, se reconoce que la diversidad del cultivo (*crop diversity*) se constituye en la materia prima fundamental para la adaptación a través de la selección [13], contribuyendo además a la estabilidad de la producción a través de la diversidad de respuesta de los organismos a perturbaciones ambientales. Se ha reconocido, por ejemplo, que en agroecosistemas tradicionales cultivos genéticamente heterogéneos son cultivados en mosaicos de variedades y especies, constituyéndose en un seguro frente a la pérdida catastrófica. Los agricultores manejan esta diversidad a través sus prácticas de cultivo, selección, e intercambio local [14]. El abandono de estas prácticas a favor de la sustitución de las variedades adaptadas localmente por las variedades comerciales de alto rendimiento ha significado una disminución considerable de la diversidad genética de los cultivos, con la consecuencia que la estrecha base genética de los cultivos modernos los hace más vulnerables a nuevas enfermedades y pestes, y menos tolerantes a condiciones ambientales extremas [15]. Si bien el productor individual puede tener incentivos para realizar dicha sustitución en la búsqueda de un mayor rendimiento, desde el punto de vista social el resultado no es óptimo pues el nivel agregado de diversidad genética en la agricultura es el resultado de millones de decisiones de cultivo hechas por agricultores individuales alrededor del mundo [16]. En términos económicos se dice entonces que las decisiones individuales causan una externalidad respecto a la producción agregada [17].

A nivel de especies, se ha documentado claramente que los arreglos productivos heterogéneos basados en el intercalamiento de cultivos (*intercropping*) y la rotación de cultivos reducen los riesgos asociados a las fluctuaciones del mercado, los cambios en las condiciones climáticas, y enfermedades y pestes [18]. En pesquerías este mismo efecto se obtiene a partir de la diversificación en las especies capturadas [19]. Varios mecanismos contribuyen a esta reducción en la variabilidad. Estos incluyen las relaciones de complementariedad entre especies, y la respuesta diferencial y asincrónica de las especies a choques ambientales [20]. A la escala de paisaje, la biodiversidad se manifiesta en la heterogeneidad de coberturas vegetales y hábitats, influenciando la complejidad estructural del paisaje. Así, las áreas de producción interactúan con otro tipo de coberturas, como humedales o bosques riparios, que proveen servicios ecosistémicos como regulación climática, hídrica, control de pestes, polinización, y protección contra eventos extremos, los cuales contribuyen a la estabilización de la producción sin que necesariamente haya una pérdida de rendimiento [21], [22].

El manejo a la escala del predio productivo influencia la presencia de biodiversidad asociada que puede contribuir de manera positiva tanto al rendimiento como a la estabilización de la producción. Por ejemplo, el bajo uso de agroquímicos y la protección de hábitats cercanos promueve la presencia de polinizadores en diversidad y densidad suficiente para aportar positivamente a la producción agrícola [23]. Así mismo, la diversidad biológica del suelo es una estrategia óptima de adaptación basada en ecosistemas frente al cambio climático [24].

Si la biodiversidad contribuye a estabilizar la producción sin que necesariamente haya una reducción en el rendimiento, entonces se puede argumentar que mejora la resiliencia del sistema de producción de alimentos al cambio climático. Así mismo, el sistema de producción de alimentos

puede entenderse como un sistema socio-ecológico toda vez que confluyen determinantes múltiples y complejos de tipo ambiental, social, político, y económico, y que incorporan múltiples escalas temporales, espaciales, e institucionales [25]. Como en la producción agrícola confluyen elementos socioculturales y ecológicos, inseparables e interdependientes, es útil para nuestros propósitos el concepto de agroecosistema, entendido este como un ecosistema manejado con el propósito de producir alimentos, combustible y fibras [9].

El agroecosistema es en sí mismo un sistema socioecológico [26] en el cual las dimensiones sociales y ecológicas de la producción se conectan a través de las prácticas de manejo de la tierra y el suelo, así como del consumo y extracción de recursos [12]. Prácticas que al influir sobre la biodiversidad modifican la capacidad de autorregulación ecológica del agroecosistema, y por lo tanto su resiliencia. Es claro que incrementar su resiliencia y reducir la vulnerabilidad de los productores y hogares al cambio climático requiere ir más allá de considerar ajustes técnicos o incorporación de tecnologías emergentes, como por ejemplo la agricultura de precisión. Se hace necesario modificar el manejo de las tierras agrícolas, buscando una mayor integración de la biodiversidad dentro los sistemas de producción. Así, por ejemplo, sistemas basados en la biodiversidad, como la agroecología o el manejo de bosques y pesquerías basados en ecosistemas, lucen promisorios para combatir la pérdida de biodiversidad, el cambio climático, y el uso no sostenible del suelo [27].

Cambio climático, adaptación y resiliencia

En términos de adaptación al cambio climático, es importante distinguir entre los cambios a largo plazo en la temperatura y precipitación promedio, del incremento más inmediato en la variabilidad climática. Esta última entendida como el aumento en la variabilidad temporal y espacial de la temperatura y las precipitaciones, y la incidencia de eventos extremos. De esta manera, es posible pensar en estrategias de adaptación multitemporales y complementarias. En el corto plazo, el reto es la gestión del riesgo climático dados los sistemas productivos existentes y las prácticas predominantes. Lo que deberá ir dando paso a la transformación de los sistemas y prácticas [28]. Esto está estrechamente ligado a la noción de resiliencia, entendida esta como la capacidad del sistema de absorber choques, adaptarse y transformarse en respuesta a los estresores externos y los procesos internos [29]. Esta definición, sin embargo, es muy vaga para que pueda ser operacionalizado con fines analíticos. La propuesta de Holing para sistemas ecológicos entiende la resiliencia como la magnitud de perturbación que un sistema puede tolerar sin cambiar a un estado diferente con diferentes controles sobre la estructura y la función [30].

En sistemas reales, la recuperación del sistema después de la perturbación no es exactamente al mismo estado en el que se encontraba antes. La recuperación se da con algunos cambios en las variables sin que ello implique un cambio fundamental en el sistema. En ecosistemas esto puede ejemplificarse como una distribución de especies un tanto diferente después de la perturbación, y en sistemas sociales como modificaciones en las relaciones, modos de vida, instituciones. En otras palabras, la recuperación se da a través también de un proceso de reorganización. Así, una conceptualización más reciente destaca tres aspectos centrales de la resiliencia: i) la cantidad de cambio que el sistema puede sufrir, manteniendo los mismos controles sobre la función y estructura; ii) el grado en el que el sistema es capaz de reorganizarse; iii) la habilidad de aprendizaje y adaptación [29]. Aplicado a los sistemas productivos alimentarios se traduce en tres dimensiones: robustez, recuperación, y reorientación [11]. Los dos primeros hacen hincapié en la capacidad del

sistema de resistir la perturbación y de volver a su estado después de la perturbación, con lo cual se toma el estatus quo como referencia, mientras que el tercero considera que el sistema se hace menos vulnerable a choques y estrés a partir de cambios estructurales.

Ahora, a diferencia de sistemas ecológicos, un sistema socio-ecológico como el de producción de alimentos es de naturaleza normativa [25]. Esto, porque la estabilidad del sistema frente a perturbaciones es en sí mismo un objetivo social deseable, al igual que los resultados del sistema. Desde el punto de vista social hay un propósito, un fin deseable. En este caso, podría afirmarse que estos fines son, simultáneamente, la seguridad alimentaria, la sostenibilidad ambiental, y el bienestar social. Acá es importante resaltar que las perturbaciones son incluso imprevistas, y que por lo tanto la gestión del riesgo debe ir más allá de las aproximaciones tradicionales en las que se mapean eventos y probabilidades de ocurrencia a fin de diseñar un plan de respuesta. En la medida que el cambio climático implica la ocurrencia de eventos por fuera del rango de experiencia documentada, esta dimensión de preparación para lo inesperado cobra especial importancia.

Para el caso colombiano, diferentes modelos que examinan escenarios de cambio climático son consistentes en mostrar un incremento en la temperatura promedio en todo el territorio nacional, mientras que para las precipitaciones tienden a haber un incremento a nivel nacional, aunque con diferencias regionales y temporales importantes, donde se destaca que para la región Caribe tiende a haber una disminución en la segunda mitad del año (junio-noviembre) para todos los escenarios de cambio climático [31]. Indudablemente, esto trae efectos importantes para la producción agrícola. Por ejemplo, se ha estimado que debido al cambio climático el área adecuada para la siembra de arroz en el país en 2050 podría reducirse en un 60% respecto a los niveles actuales [32]. En términos de rendimiento de este mismo cultivo se estima una reducción de 4% debido al cambio climático, siendo este efecto más pronunciado en el Caribe. Para maíz la reducción en rendimiento se estima en 8% y para caña de azúcar en 26% [33]. En el caso del café, la literatura muestra que los principales efectos del cambio climático sobre este cultivo son la reducción en el rendimiento, reducción en las áreas óptimas para la siembra, lo que en Colombia implica un movimiento de la siembra hacia zonas más altas, e incremento en la incidencia de plagas y enfermedades [34]. Los productores mismos también identifican una migración de cultivos hacia zonas más altas en las montañas, afectaciones en la madurez de los cultivos debido a olas de calor, pérdida de variedades locales de frijol y tomate, por ejemplo, así como la aparición de plagas [35], [36], [37], [38].

Respuesta de los agricultores al cambio

Las modificaciones ambientales, climáticas, y sociales producto del cambio climático suscita diversas respuestas por parte de los agricultores. Entre ellas se han identificado la búsqueda de variedades tolerantes al calor y la escasez de agua, la consecución de ingresos por fuera de la finca, el aseguramiento financiero, la reubicación de la producción, la diversificación de cultivos, la agroforestería. Acciones que pueden ser individuales o colectivas. De manera interesante, se ha identificado la conservación de bosques y avifauna como estrategia de adaptación por parte de cultivadores localizados en zonas adyacentes a áreas protegidas [35]. Ahora, sobre cuál estrategia es más efectiva y/o las razones que llevan a preferir una sobre otra, la literatura ofrece algunas pistas, aunque esta es un área de estudio que amerita un mayor desarrollo. En particular, se anota que las percepciones sobre los riesgos moldean las respuestas de los agricultores, y lo que es más importante aún, que dichas percepciones no necesariamente coinciden con las de los expertos y

formuladores de políticas, lo que hace más factible que las políticas sean inefectivas [39], [40], [41], [42]

Si bien el conocimiento técnico-científico es considerado fundamental para enfrentar el cambio climático en Colombia [43], [44], [45], la respuesta al cambio climático debe trascender los aspectos técnicos de la producción y las opciones tecnológicas, para entender bien las causas socioeconómicas de la vulnerabilidad de los productores y por lo tanto avanzar en la comprensión de sus acciones ¿Qué es lo que hace que sus respuestas sean adaptativas a su entorno social y ambiental? [40], [46]. Más aún, en sistemas dominados por pequeños productores y caracterizados por heterogeneidad microclimática y socio-ecológica, las respuestas a los desafíos del cambio climático deben estar ajustadas al contexto, donde la adaptación es el resultado de la interacción de las capacidades y vulnerabilidades de los productores con el contexto social y ecológico en el que deben desenvolverse.

Lo anterior es clave, pues del conjunto de medidas de adaptación que involucran algún componente de la biodiversidad, la viabilidad de ellas estará en función de las condiciones ecológicas, ambientales, sociales, económicas y culturales relevantes para el productor. Así, por ejemplo, el impulso a sistemas silvopastoriles en la producción ganadera presupone que los ganaderos ven esta práctica como deseable, lo que no es necesariamente cierto [39]. Dentro de las estrategias adaptativas que tienen que ver directamente con la biodiversidad se han identificado la diversificación de cultivos, arreglos con múltiples cultivos simultáneamente, el mantenimiento e intercambio de variedades localmente adaptadas, el uso de arreglo de agroforestería y silvopastoriles, y la conservación [12]. Los estudios de caso de sistemas de producción en Colombia que integran la biodiversidad a través de principios agroecológicos muestran que no siempre hay un trade-off entre conservación y producción, sino que a escala de la unidad productiva la sinergia es posible [47], [48], [49].

A una escala más amplia, se ha determinado que composición del paisaje alrededor de los predios agrícolas influye en la cantidad y calidad de los servicios ecosistémicos que aporta la biodiversidad a la agricultura [50]. Paisajes más diversificados y multifuncionales que cuenten con áreas naturales tienen un efecto positivo en la producción y en la resiliencia agrícola, mientras que, paisajes simplificados y poco diversos tienen un efecto negativo, por ejemplo, al aumentar el riesgo por infestación de plagas [1]. Evidencia para Colombia muestra que la cercanía áreas de bosque incrementa la presencia de especies de aves y escarabajos dentro de la granja o unidad productiva [51]. Así mismo, se ha establecido la importancia en Colombia de áreas protegidas, remanentes de bosque seco tropical, y otros hábitats naturales, para la conservación de la diversidad filogenética de las variedades salvajes de especies cultivadas (crop wild relatives) [52].

Todo lo anterior se traduce en impactos sobre el bienestar de los hogares productores. Es claro que los modos de vida de las poblaciones rurales suelen depender de forma regular del uso de recursos naturales y la provisión de servicios del ecosistema, con lo cual terminan siendo altamente vulnerables a la degradación de los ecosistemas y los choques climáticos, especialmente si su capacidad de suavizar el consumo a través de los mercados de crédito, trabajo y aseguramiento son limitadas. En consecuencia, estas poblaciones enfrentan una alta variabilidad del ingreso debido a factores climáticos y biológicos. En estas circunstancias, no es extraño encontrar que las poblaciones que enfrentan estas condiciones de variabilidad tienden a adoptar reglas o procedimientos de

diversificación, es decir coberturas naturales del riesgo, así como de precaución, con el fin de minimizar la posibilidad de enfrentar pérdidas catastróficas. En este sentido, aun cuando una estrategia de diversificación cultivos, por ejemplo, produzca un rendimiento esperado inferior a un monocultivo, no por ello no es óptima o irracional [53].

Caminos para la transformación

El tránsito de sistemas productivos de monocultivo e intensivos en agroquímicos hacia otros basados en la biodiversidad no significa comprometer la capacidad de producción de alimentos [54]. De hecho, evidencia reciente muestra que al menos el 50% de los alimentos a nivel global son producidos por productores pequeños en menos del 25% de la tierra arable [54], y que las granjas pequeñas tienen en promedio rendimientos más altos y albergan más biodiversidad [55]. Esto es de especial relevancia para Colombia, donde aproximadamente el 60% de las unidades de producción agropecuaria son inferiores al 5ha, y el 93% de los productores son personas naturales, de los cuales el 95% se consideran campesinos [56]. Sin embargo, a pesar de que los pequeños productores tienden a tener una mayor diversificación productiva, la evidencia para Colombia señala que hay un proceso de especialización productiva, es decir, en una tendencia progresiva a la consolidación de monocultivos [57]. Detrás de esta dinámica puede mencionarse la búsqueda de integración en mercados, las oportunidades de corto plazo por la disponibilidad de agroquímicos, políticas públicas, la configuración de paisajes adecuados para la mecanización de la producción, entre otros [58].

El tránsito requiere identificar alternativas viables, situadas en el contexto, comprensión de las barreras para el cambio, entendiendo que estas tienen que ver con conductas del productor, pero también con la estructura de incentivos del entorno en el que actúa, es decir las instituciones. Más fundamental aún, la transformación no puede operar sobre una aceptación incuestionable de los fines que debe servir el sistema de producción. Si el cambio climático es un motor externo de cambio, perturbación y estrés, la resiliencia a este tiene que ver sobre todo con los fines perseguidos y los principios orientadores. Así, por ejemplo, si se migra de una preocupación por la productividad hacia una en la que la agricultura alcanza objetivos simultáneos de seguridad alimentaria y conservación de la biodiversidad, la resiliencia del agroecosistema se valorará en términos de su capacidad para alcanzar estos objetivos a pesar de las perturbaciones del clima. En este sentido, se ha sugerido la adopción de sistemas de producción diversificados basados en prácticas agroecológicas [27] como el camino a seguir.

¿Cómo lograr la transformación del sistema productivo en aras de lograr una integración de la biodiversidad conducente a mejorar la resiliencia climática? Si partimos de la premisa que la transformación se concreta y configura a partir de las acciones de los actores, como los productores, en respuesta a cambios en el entorno a fin de capitalizar una oportunidad o mitigar el impacto de una amenaza, entonces un aspecto clave a estudiar es el entorno institucional. Las instituciones son primordiales porque influyen la vida social, la organización económica y el comportamiento de los sistemas productivos. Su importancia radica en que reflejan las convenciones desarrolladas sobre el comportamiento de individuos y grupos relativos a su propio comportamiento y al de los demás, proporcionando seguridad sobre las acciones de los otros, y dando orden y estabilidad a las expectativas en el complejo e incierto mundo de las relaciones económicas y sociales [59].

En el corto plazo las instituciones pueden considerarse como un conjunto de parámetros o restricciones, pero en el largo plazo están en constante cambio. En este sentido, las instituciones son susceptibles de transformación, lo cual es importante dado que las instituciones no necesariamente mejoran la capacidad adaptativa de los agricultores, de hecho, pueden ser maladaptativas [60]. Así, la literatura que la teoría institucional ha aportado a los estudios ambientales en tres aspectos: externalidades, derechos de propiedad y costos de transacción. En consideración de lo anterior, los actores del sistema de producción en tanto agentes económicos están sujetos a lo que se denomina racionalidad limitada, particularmente debido a la elección que deben realizar entre un número limitado de alternativas posibles y al conocimiento imperfecto de cada transacción. Igualmente, los agentes económicos ante la posibilidad de obtener máximo provecho de las transacciones actúan de forma oportunista [61].

Por otro lado, como consecuencia de la racionalidad limitada y al oportunismo, los agentes económicos se ven afectados por un entorno de incertidumbre basado en las posibilidades de cambios, lo cual se da por la falta de información que un agente puede tener respecto a las decisiones tomadas por otros y por la existencia de comportamiento estratégicos. Finalmente, los otros dos aspectos que también influyen en el comportamiento de los agentes, es la existencia de *información asimétrica*, la cual genera mayor capacidad de decisión a los agentes en el momento de emprender una transacción [62], y a la especificidad de los activos, es decir el lugar donde se establece la inversión en activos físicos y los recursos humanos que determinan las características de bilateralidad entre los agentes.

De lo anterior se desprende, que el comportamiento de los agentes económicos, representado por el oportunismo, la racionalidad limitada, la disponibilidad de información y la necesidad de prever circunstancias desfavorables genera costos de transacción [62]. Como unidad de análisis, los costos de transacción permiten entender la dinámica de los mercados agrícolas en términos de los actores que se relacionan a través de la transacción, y por lo tanto abre la puerta para la incorporación de elementos clave que repercuten en las decisiones de producción, tales como: la confianza y las relaciones, los contratos formales e informales, los encadenamientos, las asimetrías de información, y las alianzas estratégicas. Dado que la producción de alimentos no ocurre en el vacío, sino que está inmersa en encadenamientos productivos y circuitos de comercialización, es clave entender como esto impulsa la predominancia de ciertas formas de producción- ej. monocultivo- al tiempo que inhibe otras -ej. agroforestería. Por ejemplo, los modelos de agricultura por contrato podrían limitar la integración de la biodiversidad si al comprometer al productor con unos volúmenes y calidades determinadas del bien agrícola inducen una práctica de monocultivo.

Conclusión

La transformación del sistema de producción de alimentos no solo es necesaria para la reducir la pérdida de biodiversidad, sino que funciona fundamentalmente para la gente. Dado que un agroecosistema es un espacio de interacción entre los sistemas de producción agrícola, socioculturales y ecológicos, vemos que la biodiversidad termina contribuyendo de manera fundamental al bienestar de la gente. De manera indirecta, a través de su efecto sobre el rendimiento y estabilidad de la producción, y, por lo tanto, de los ingresos de los productores agropecuarios. De manera directa, al favorecer el mantenimiento de modos de vida que son constitutivos de la identidad de las personas y las comunidades. Esto es particularmente importante para hogares y comunidades rurales dependientes del uso de recursos naturales y la oferta de

servicios ecosistémicos, para quienes los eventos extremos y la degradación ambiental pueden significar la caída en una trampa de pobreza [63]. La evidencia al respecto indica que la biodiversidad mitiga el impacto de los choques ambientales sobre la producción y los ingresos de agricultores y pescadores, reduciendo la vulnerabilidad de estos al cambio climático [19], [64], [65].

Si bien hay suficiente evidencia sobre la conveniencia de reconfigurar los sistemas productivos hacia unos más biodiversos, el entendimiento sobre cómo lograrlo es insuficiente [1], [54]. Para empezar, el agroecosistema opera simultáneamente a múltiples escalas interrelacionadas, desde la unidad productiva individual hasta la escala global, y por lo tanto las barreras a la transformación tienen que ver tanto con las decisiones que toma el agricultor individual como con el entorno institucional que moldea sus acciones. A nivel del ambiente institucional se reconoce que los sistemas de producción han sido distorsionados por esquemas de subsidios, incentivos de mercado, y ausencia de regulaciones para evitar la externalización de impactos ambientales y de salud pública, o la incapacidad estatal para hacer cumplir dichas regulaciones. Así mismo, la formulación de políticas públicas también puede constituirse en un obstáculo en la medida que estas promuevan la especialización y el incremento de la productividad, y que el conocimiento local y contextualizado no juegue un papel central en la definición de objetivos y medios. A nivel individual, se han identificado como barreras la falta de recursos para invertir en nuevas alternativas de producción, las fallas de información, la aversión al riesgo, y la adherencia a normas sociales que inhiben el cambio conductual [66].

Referencias

- [1] F. A. J. DeClerck *et al.*, “A Whole Earth Approach to Nature-Positive Food: Biodiversity and Agriculture,” in *Science and Innovations for Food Systems Transformation*, J. von Braun, K. Afsana, L. O. Fresco, and M. H. A. Hassan, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 469–496. doi: 10.1007/978-3-031-15703-5_25.
- [2] F. N. P. M. D. C. IDEAM, “Informe del inventario nacional de gases efecto invernadero 1990-2018 y carbono negro 2010-2018 de Colombia. Tercer informe bienal de actualización de cambio climático, BUR3,” 2022.
- [3] C. F. Álvarez Hincapié *et al.*, “Estado de la biodiversidad en Colombia,” in *Evaluación Nacional de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos de Colombia*, R. Gómez-S., M. E. Chaves, W. Ramírez, M. Santamaría, G. , Andrade, C. Solano, and S. Aranguren, Eds., Bogotá D.C: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo y el Centro Mundial de Monitoreo para la Conservación del PNUMA, Ministerio Federal de Medio Ambiente de la República Federal Alemana, 2021, ch. 2, pp. 100–369.
- [4] M. A. Altieri, “The ecological role of biodiversity in agroecosystems,” in *Invertebrate Biodiversity as Bioindicators of Sustainable Landscapes*, M. G. Paoletti, Ed., Amsterdam: Elsevier, 1999, pp. 19–31. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50019-9.50005-4>.
- [5] S. F. Melo, L. Riveros, G. Romero, J. C. Farfán, A. Alvarez-Espinoza, and C. Díaz, “Estimación de impactos del cambio climático en el sector agricultura y seguridad alimentaria,” 2020.

- [6] S. J. Vermeulen, B. M. Campbell, and J. S. I. Ingram, "Climate Change and Food Systems," *Annu Rev Environ Resour*, vol. 37, no. 1, pp. 195–222, Oct. 2012, doi: 10.1146/annurev-environ-020411-130608.
- [7] J. Rockström, O. Edenhofer, J. Gaertner, and F. DeClerck, "Planet-proofing the global food system," *Nat Food*, vol. 1, no. 1, pp. 3–5, 2020, doi: 10.1038/s43016-019-0010-4.
- [8] J. von Braun, K. Afsana, L. O. Fresco, M. Hassan, and M. Torero, "Food system concepts and definitions for science and political action," *Nat Food*, vol. 2, no. 10, pp. 748–750, 2021, doi: 10.1038/s43016-021-00361-2.
- [9] J. F. Cabell and M. Oelofse, "An Indicator Framework for Assessing Agroecosystem Resilience," *Ecology and Society*, vol. 17, no. 1, 2012, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/26269017>
- [10] W. L. Bland and M. M. Bell, "A holon approach to agroecology," *Int J Agric Sustain*, vol. 5, no. 4, pp. 280–294, Jan. 2007, doi: 10.1080/14735903.2007.9684828.
- [11] M. Zurek *et al.*, "Annual Review of Environment and Resources Food System Resilience: Concepts, Issues, and Challenges," 2022, doi: 10.1146/annurev-environ-112320.
- [12] A. DuVal, D. Mijatovic, and T. Hodgkin, "The contribution of biodiversity for food and agriculture to the resilience of production systems –Thematic Study for The State of the World’s Biodiversity for Food and Agriculture," Rome, 2019.
- [13] D. Pilling, J. Bélanger, and I. Hoffmann, "Declining biodiversity for food and agriculture needs urgent global action," *Nat Food*, vol. 1, no. 3, pp. 144–147, 2020, doi: 10.1038/s43016-020-0040-y.
- [14] C. K. Khoury *et al.*, "Crop genetic erosion: understanding and responding to loss of crop diversity," *New Phytologist*, vol. 233, no. 1, pp. 84–118, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.1111/nph.17733>.
- [15] A. W. Ebert and J. M. M. Engels, "Plant Biodiversity and Genetic Resources Matter!," *Plants*, vol. 9, no. 12, 2020, doi: 10.3390/plants9121706.
- [16] G. Heal *et al.*, "Genetic diversity and interdependent crop choices in agriculture," *Resour Energy Econ*, vol. 26, no. 2, pp. 175–184, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2003.11.006>.
- [17] B. Lanz, S. Dietz, and T. Swanson, "The Expansion of Modern Agriculture and Global Biodiversity Decline: An Integrated Assessment," *Ecological Economics*, vol. 144, pp. 260–277, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.07.018>.
- [18] S. J. Himanen, H. Mäkinen, K. Rimhanen, and R. Savikko, "Engaging Farmers in Climate Change Adaptation Planning: Assessing Intercropping as a Means to Support Farm Adaptive Capacity," *Agriculture*, vol. 6, no. 3, 2016, doi: 10.3390/agriculture6030034.
- [19] A. Vargas, S. Restrepo, and D. Diaz, "The portfolio effect in a small-scale fishery reduces catch and fishing income variability in a highly dynamic ecosystem," *PLoS One*, vol. 17, no.

- 8, pp. e0271172-, Aug. 2022, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271172>
- [20] M. Loreau *et al.*, “Biodiversity as insurance: from concept to measurement and application,” *Biological Reviews*, vol. 96, no. 5, pp. 2333–2354, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1111/brv.12756>.
- [21] J.-P. Chavas, “On the Productive Value of Biodiversity,” *Environ Resour Econ (Dordr)*, vol. 42, no. 1, pp. 109–131, 2009, doi: [10.1007/s10640-008-9206-z](https://doi.org/10.1007/s10640-008-9206-z).
- [22] D. J. Abson, E. D. G. Fraser, and T. G. Benton, “Landscape diversity and the resilience of agricultural returns: a portfolio analysis of land-use patterns and economic returns from lowland agriculture,” *Agric Food Secur*, vol. 2, no. 1, p. 2, 2013, doi: [10.1186/2048-7010-2-2](https://doi.org/10.1186/2048-7010-2-2).
- [23] V. , V. A. , B. M. , C. V. , G. V. A. , P. H. M. , R. R. A. , T. J. , E. G. , L. B. E. , Á. C. , M. M. W. , R. M. González, “Contribuciones de la naturaleza para la gente,” in *Evaluación nacional de biodiversidad y servicios ecosistémicos de Colombia*, R. Gómez, M. E. Chaves, W. Ramírez, M. Santamaría, G. Andrade, and S. Aranguren, Eds., Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, PNUMA, Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania, 2021, pp. 370–489.
- [24] Y. Sidibé, S. Foudi, U. Pascual, and M. Termansen, “Adaptation to Climate Change in Rainfed Agriculture in the Global South: Soil Biodiversity as Natural Insurance,” *Ecological Economics*, vol. 146, pp. 588–596, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.12.017>.
- [25] J. Hodbod and H. Eakin, “Adapting a social-ecological resilience framework for food systems,” *J Environ Stud Sci*, vol. 5, no. 3, pp. 474–484, 2015, doi: [10.1007/s13412-015-0280-6](https://doi.org/10.1007/s13412-015-0280-6).
- [26] S. Ortiz, R. de la Pava, and C. Quiriga, “Agrobiodiversidad y cultura: un análisis desde el lugar y los agroecosistemas en la cuenca alta del río Tunjuelo en Bogotá,” *Entorno Geográfico*, vol. 3, 2017.
- [27] C. Kremen and A. M. Merenlender, “Landscapes that work for biodiversity and people,” *Science (1979)*, vol. 362, no. 6412, p. eaau6020, Oct. 2018, doi: [10.1126/science.aau6020](https://doi.org/10.1126/science.aau6020).
- [28] A. JARVIS *et al.*, “AN INTEGRATED ADAPTATION AND MITIGATION FRAMEWORK FOR DEVELOPING AGRICULTURAL RESEARCH: SYNERGIES AND TRADE-OFFS,” *Exp Agric*, vol. 47, no. 2, pp. 185–203, 2011, doi: DOI: [10.1017/S0014479711000123](https://doi.org/10.1017/S0014479711000123).
- [29] C. Folke, S. R. Carpenter, B. Walker, M. Scheffer, T. Chapin, and J. Rockström, “Integrating Resilience, Adaptability and Transformability,” *Ecology and Society*, vol. 15, no. 4, 2010, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/26268226>
- [30] M. Scheffer, *Critical transitions in nature and society*. Princenton, NJ: Princenton University Press, 2009.

- [31] P. A. Arias *et al.*, "Implicaciones metodológicas e inconsistencias de la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático de Colombia," *Rev Acad Colomb Cienc Exactas Fis Nat*, vol. 46, no. 180, pp. 769–794, Sep. 2022, doi: 10.18257/raccefyn.1705.
- [32] F. Castro-Llanos, G. Hyman, J. Rubiano, J. Ramirez-Villegas, and H. Achicanoy, "Climate change favors rice production at higher elevations in Colombia," *Mitig Adapt Strateg Glob Chang*, vol. 24, no. 8, pp. 1401–1430, 2019, doi: 10.1007/s11027-019-09852-x.
- [33] F. Boshell, T. S. Thomas, N. Vijay, and N. Cenacchi, "Climate change, agriculture, and adaptation options for Colombia.," *IFPRI-Discussion Papers*, no. 1790, 2018.
- [34] Y. Pham, K. Reardon-Smith, S. Mushtaq, and G. Cockfield, "The impact of climate change and variability on coffee production: a systematic review," *Clim Change*, vol. 156, no. 4, pp. 609–630, 2019, doi: 10.1007/s10584-019-02538-y.
- [35] M. G. Barrucand, C. Giraldo Vieira, and P. O. Canziani, "Climate change and its impacts: perception and adaptation in rural areas of Manizales, Colombia," *Clim Dev*, vol. 9, no. 5, pp. 415–427, Jul. 2017, doi: 10.1080/17565529.2016.1167661.
- [36] J. J. Núñez, D. M. Carrero, J. C. Carvajal, and O. Mendoza, "Assessing the impact of climate change on agriculture in Norte de Santander, Colombia," *J Phys Conf Ser*, vol. 1126, no. 1, p. 012045, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1126/1/012045.
- [37] H. Botero, A. Barnes, L. Perez, D. Rios, and J. Ramirez-Villegas, "Classifying climate change perceptions of bean breeders in Santander-Colombia," *Clim Dev*, vol. 13, no. 8, pp. 663–676, Sep. 2021, doi: 10.1080/17565529.2020.1848782.
- [38] J. Eise, N. J. Lambert, and E. C. Wiemer, "Leveraging communities' network strengths to support climate change adaptation information-sharing: a study with coffee farmers in Risaralda, Colombia," *Clim Change*, vol. 168, no. 1, p. 12, 2021, doi: 10.1007/s10584-021-03206-w.
- [39] A. Camargo, "Imagined transitions: agrarian capitalism and climate change adaptation in Colombia," *J Peasant Stud*, vol. 49, no. 4, pp. 713–733, Jun. 2022, doi: 10.1080/03066150.2022.2059350.
- [40] G. Feola, "What (science for) adaptation to climate change in Colombian agriculture? A commentary on 'A way forward on adaptation to climate change in Colombian agriculture: perspectives towards 2050' by J. Ramirez-Villegas, M. Salazar, A. Jarvis, C. E. Navarro-Valcines," *Clim Change*, vol. 119, no. 3, pp. 565–574, 2013, doi: 10.1007/s10584-013-0731-6.
- [41] A. Eitzinger, C. R. Binder, and M. A. Meyer, "Risk perception and decision-making: do farmers consider risks from climate change?," *Clim Change*, vol. 151, no. 3, pp. 507–524, 2018, doi: 10.1007/s10584-018-2320-1.
- [42] F. Howland and J. Francois Le Coq, "Disaster risk management, or adaptation to climate change? The elaboration of climate policies related to agriculture in Colombia," *Geoforum*, vol. 131, pp. 163–172, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2022.02.012>.

- [43] J. Tapasco, J. F. LeCoq, A. Ruden, J. S. Rivas, and J. Ortiz, "The Livestock Sector in Colombia: Toward a Program to Facilitate Large-Scale Adoption of Mitigation and Adaptation Practices," *Front Sustain Food Syst*, vol. 3, 2019, [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2019.00061>
- [44] A. M. Loboguerrero *et al.*, "Bridging the gap between climate science and farmers in Colombia," *Clim Risk Manag*, vol. 22, pp. 67–81, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.crm.2018.08.001>.
- [45] N. Forero and C. González, "Agricultura Climáticamente Inteligente (ACI) en Colombia: diagnóstico y retos de política pública," 2020.
- [46] G. Feola and C. R. Binder, "Towards an improved understanding of farmers' behaviour: The integrative agent-centred (IAC) framework," *Ecological Economics*, vol. 69, no. 12, pp. 2323–2333, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.07.023>.
- [47] I. Montes-Londoño, A. Calle, O. Montes, and A. Montes, "Hacienda Pinzacuá: An Example of Regenerative Agriculture Amidst a Transformed Landscape in the Colombian Andes," in *Biodiversity Islands: Strategies for Conservation in Human-Dominated Environments*, Springer, 2022, pp. 305–335.
- [48] F. A. Vallejo Cabrera, M. del Carmen Salazar Villarreal, L. E. Nieto Gómez, and R. G. Díaz, "Sustainability of agroecosystems in a Rural Reserve Area of Pradera, Valle del Cauca, Colombia," *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 7, p. 100040, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100040>.
- [49] Z. Calle D *et al.*, "A Highly Productive Biodiversity Island Within a Monoculture Landscape: El Hatico Nature Reserve (Valle del Cauca, Colombia)," in *Biodiversity Islands: Strategies for Conservation in Human-Dominated Environments*, F. Montagnini, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 279–304. doi: 10.1007/978-3-030-92234-4_11.
- [50] J. Avelino, A. Romero-Gurdián, H. F. Cruz-Cuellar, and F. A. J. Declerck, "Landscape context and scale differentially impact coffee leaf rust, coffee berry borer, and coffee root-knot nematodes," *Ecological Applications*, vol. 22, no. 2, pp. 584–596, Mar. 2012, doi: <https://doi.org/10.1890/11-0869.1>.
- [51] J. J. Gilroy, F. A. Edwards, C. A. Medina Uribe, T. Haugaasen, and D. P. Edwards, "EDITOR'S CHOICE: Surrounding habitats mediate the trade-off between land-sharing and land-sparing agriculture in the tropics," *Journal of Applied Ecology*, vol. 51, no. 5, pp. 1337–1346, Oct. 2014, doi: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12284>.
- [52] C. E. González-Orozco, C. C. Sosa, A. H. Thornhill, and S. W. Laffan, "Phylogenetic diversity and conservation of crop wild relatives in Colombia," *Evol Appl*, vol. 14, no. 11, pp. 2603–2617, Nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.1111/eva.13295>.
- [53] C. Paul, N. Hanley, S. T. Meyer, C. Fürst, W. W. Weisser, and T. Knoke, "On the functional relationship between biodiversity and economic value," *Sci Adv*, vol. 6, no. 5, p. eaax7712, Jun. 2023, doi: 10.1126/sciadv.aax7712.

- [54] C. I. Nicholls and M. A. Altieri, "Pathways for the amplification of agroecology," *Agroecology and Sustainable Food Systems*, vol. 42, no. 10, pp. 1170–1193, Nov. 2018, doi: 10.1080/21683565.2018.1499578.
- [55] V. Ricciardi, Z. Mehrabi, H. Wittman, D. James, and N. Ramankutty, "Higher yields and more biodiversity on smaller farms," *Nat Sustain*, vol. 4, no. 7, pp. 651–657, 2021, doi: 10.1038/s41893-021-00699-2.
- [56] DANE, "Encuesta Nacional Agropecuaria 2019," 2020.
- [57] J. Leibovich, J. J. Perfetti, S. Botello, and H. Vasquez, "El proceso de transformación agrícola en Colombia: un análisis microeconómico," Bogotá D.C, 2010.
- [58] T. E. Crews, W. Carton, and L. Olsson, "Is the future of agriculture perennial? Imperatives and opportunities to reinvent agriculture by shifting from annual monocultures to perennial polycultures," *Global Sustainability*, vol. 1, p. e11, 2018, doi: DOI: 10.1017/sus.2018.11.
- [59] G. Schmitt and I. Blanco, "El papel de las instituciones en la formulación de la política agraria: repercusiones sobre el sector agrario en una economía mundial en crisis," *Agricultura y Sociedad*, vol. 38–39, pp. 69–90, 1986.
- [60] E. W. M. Kool, R. Compes López, and S. E. Werners, "The influence of institutions on the climate change adaptative capacity of winegrowers in Utiel-Requena," *Revista Espanola de estudios agrosociales y pesqueros*, vol. 251, pp. 79–99, 2018.
- [61] M. Kherallah and J. F. Kirsten, "THE NEW INSTITUTIONAL ECONOMICS: APPLICATIONS FOR AGRICULTURAL POLICY RESEARCH IN DEVELOPING COUNTRIES: 'New institutional economists are the blue-collar guys with a hearty appetite for reality.' Oliver Williamson, 2000a," *Agrekon*, vol. 41, no. 2, pp. 110–133, 2002.
- [62] O. Williamson, *Las instituciones económicas del capitalismo*. México: Fondo de Cultura Económica, 1989.
- [63] E. B. BARBIER, "Poverty, development, and environment," *Environ Dev Econ*, vol. 15, no. 6, pp. 635–660, 2010, doi: DOI: 10.1017/S1355770X1000032X.
- [64] F. Noack, M.-C. Riekhof, and S. Di Falco, "Droughts, Biodiversity, and Rural Incomes in the Tropics," *J Assoc Environ Resour Econ*, vol. 6, no. 4, pp. 823–852, Mar. 2019, doi: 10.1086/703487.
- [65] S. Di Falco and J.-P. Chavas, "Rainfall Shocks, Resilience, and the Effects of Crop Biodiversity on Agroecosystem Productivity," *Land Econ*, vol. 84, no. 1, p. 83, Feb. 2008, doi: 10.3368/le.84.1.83.
- [66] A. M. Mobarak and N. A. Saldanha, "Remove barriers to technology adoption for people in poverty," *Nat Hum Behav*, vol. 6, no. 4, pp. 480–482, 2022, doi: 10.1038/s41562-022-01323-9.

