**Efectos de la aplicación única de fertilizantes orgánicos en los rendimientos de cultivos y residuos a largo plazo, y la evaluación de la calidad del suelo utilizando la agricultura biointensiva**

John Beeby1\*, Steve Moore2\*, Laura Taylor3, Samuel Nderitu4

1Ciencias del Suelo y los Cultivos, Universidad de Cornell, Ithaca, NY, 2Agroecología, Elon University Elon NC, (retirado), 3Departamento de Matemáticas y Estadística, Universidad de Elon, Elon NC, 4 Codirector Ejecutivo, Grow Biointensive Agricultural Center of Kenya (G-BIACK), Thika, Kenia

\*Correspondencia: John Beeby-jsb76@cornell.edu, Steve Moore harmonyessentials@gmail.com

**Abstracto**

Antecedentes: Cerrar la brecha de rendimientos, especialmente en África, utilizando métodos ambientalmente apropiados y sostenibles es importante para satisfacer las demandas alimentarias actuales y futuras. Cultivo Biointensivo de Alimentos (CBA) es un método orgánico que combina ocho principios sustentables que pueden cerrar la brecha de rendimiento, aumentar la producción de alimentos, mejorar la calidad del suelo y reducir la pérdida de nutrientes del suelo.

Método: Utilizando el método CBA cuatro granjas kenianas durante cuatro años probaron el efecto de una aplicación única de fertilizantes orgánicos (recomendados sobre la base de pruebas de suelo) en los rendimientos de cultivos y residuos y los niveles de parámetros del suelo.

Resultados: Los rendimientos comestibles anuales de los cultivos aumentaron en general para el maíz, el sorgo y las patatas. El amaranto no mostró ningún cambio significativo. Los rendimientos anuales de residuos de cultivo aumentaron para las papas y aumentaron marginalmente para amaranto, maíz y sorgo. Los cambios en la práctica de cosecha del caupí y el lablab hicieron la interpretación más compleja, pero tanto los rendimientos comestibles como los de residuos para estos cultivos variaron sin cambios a aumentar significativamente. Catorce parámetros del suelo fueron probados. El boro, la conductividad eléctrica, el magnesio, la materia orgánica, el fósforo, el potasio, el azufre y el zinc aumentaron significativamente. Calcio, cobre, hierro, pH y sodio no mostraron cambios significativos, y sólo los niveles de manganeso disminuyeron significativamente.

Conclusión: Combinando una sola aplicación de fertilizantes orgánicos recomendados y el método CBA, los agricultores pueden ser capaces de mejorar sus rendimientos de cultivo y mantener la fertilidad del suelo de una manera más sostenible.

**Palabras clave: agricultura** sostenible, agricultura biointensiva, orgánica, fertilidad del suelo, brecha de rendimiento, sostenibilidad, agricultura renovable, África

**Introducción**

Los sistemas alimentarios mundiales se enfrentan a dos desafíos principales: 1) alimentar a una población en crecimiento con un aumento de los niveles de consumo de calorías y productos animales (Bodirsky 2015, Sans 2015); y 2) apoyar los servicios ecosistémicos, restaurar los recursos naturales degradados por prácticas agrícolas insostenibles y mantenerse dentro de límites biofísicos operativos seguros (Godray 2010, Foley 2011, Rockström 2009, Rockström 2015).

África se enfrenta a estos desafíos de maneras únicas y exigentes. El 40% de los niños menores de cinco años en áfrica subsahariana (SSA) sufren retraso en el crecimiento de la desnutrición (Montpellier 2013) y el 23% de la población africana está clasificada como hambrienta (FAO 2012). La duplicación prevista del tamaño de la población para 2050 (ONU 2010) y el aumento de la demanda de productos calóricos y animales (Roxburgh 2013) ponen mayores cargas en los sistemas de producción de alimentos. Abordar estas necesidades alimentarias dentro de las limitaciones del desarrollo sostenible, como la limitada disponibilidad de agua, energía y tierra, y la pérdida de biodiversidad añade desafíos adicionales (Foley 2011, Montpellier, 2013). El cumplimiento de estos objetivos en el contexto de la soberanía alimentaria es cada vez más importante para mejorar la seguridad alimentaria dados los desafíos descritos anteriormente (Nyeleni 2007).

La producción moderna de alimentos convencionales muestra signos de estancamiento de la producción, agotamiento de los recursos y estrés en el medio ambiente (Media 2003, Moore 2010). Las prácticas agrícolas africanas comunes de bajo aporte han resultado perjudiciales para la salud del suelo y presentan bajos rendimientos (Akinnifesi 2010). Para exacerbar aún más estas preocupaciones, en la SSA, se espera que el cambio climático tenga impactos negativos en la seguridad alimentaria futura (IPCC 2007, Liu 2013, Cairns 2013, Folberg 2014).

Varios sistemas alternativos de producción de alimentos pueden reducir los impactos ambientales negativos al tiempo que apoyan los servicios de los ecosistemas. Estos sistemas de producción más naturales incluyen orgánicos (Muller 2017, Reganold 2016), agroecológicos (Silici 2014), sostenibles, agricultura de conservación (Brouder 2014), Intensificación Sostenible (SI) (Montpellier 2013) y Grow Biointensive Sustainable Agriculture (CBA) (Jeavons 2001). Muchos de estos sistemas alternativos han sido propuestos como soluciones y cuestionados por afirmaciones de que no son opciones viables para alimentar al mundo (Badgley 2007, Seufert 2012). Además, todavía pueden tener impactos ambientales negativos (Seufert 2012, Kirchmann 2001).

En particular, la Intensificación Sostenible (SI) ha sido propuesta y apoyada como una posible solución a estos desafíos por las principales organizaciones internacionales de desarrollo (Godfray 2010, Montpellier 2013, Banco Mundial 2013, USAID 2012). Sin embargo, el término tiene un significado nublado (Petersen 2015) y puede tener consecuencias ambientales negativas si se utilizan mayores tasas de aplicación de fertilizantes a base de productos químicos (Tilman 2011). Para muchos, la promoción y el uso de fertilizantes químicos en SI compromete el término "sostenible" (Peterson 2015, Mahón 2018). Pretty (2011) hace hincapié en la necesidad de aumentar la productividad y disminuirel impacto ambientalnegativo en su definición: "La intensificación agrícola sostenible se define como producir más producción de la misma área de tierra, al tiempo que reduce los impactos ambientales negativos y al mismo tiempo aumenta las contribuciones al capital natural y al flujo de servicios ambientales". Esta definición está en consonancia con un principio de agroecología para minimizar el uso o eliminar entradas externas (Gliessman 1990).

Un método para alcanzar los objetivos de intensificación, especialmente los articulados por Pretty (2011), es la Agricultura Sostenible Biointensiva de Crecimiento (CBA). Ocho principios se combinan y trabajan sinérgicamente en CBA para mejorar los rendimientos y la fertilidad del suelo, satisfacer las necesidades nutricionales humanas, reducir la dependencia externa de los insumos, apoyar los servicios ecosistémicos y abordar la soberanía alimentaria (Jeavons 2001, Bomford 2009, Omondi 2014, Moore 2010, Rajbhandari 2011).

Los tres primeros principios se centran en la construcción del suelo y el agua y el ciclismo de nutrientes.

Principio 1 - Construir y mantener una calidad profunda del suelo (hasta 60 cm de profundidad) apoyada por pasillos y camas permanentes.

Principio 2 - Diseñar y cultivar cultivos de carbono y nitrógeno para la construcción de suelos.

Principio 3 - Producir composta eficientemente para optimizar la actividad biológica del suelo y reducir la pérdida de nutrientes del sistema.

Los siguientes dos principios trabajan para lograr mayores rendimientos a través del espaciado intensivo de las plantas, el cultivo múltiple, el uso de trasplantes para mejorar la cobertura del suelo y el aprovechamiento de las relaciones alelopáticas.

Principio 4 - Intensificación de la planta

Principio 5 - Biodiversidad Funcional

Los dos siguientes principios abordan las necesidades nutricionales humanas.

Principio 6 - Diseñar y producir dietas humanas nutricionalmente completas.

Principio 7 - Lograr la soberanía de las semillas principalmente a través de variedades polinizados abiertas que son de origen local y criadas para satisfacer las demandas culturales locales, mejorar el rendimiento, la resistencia a plagas y la adaptabilidad climática creando un sistema resiliente.

El último principio reúne todos los principios en un sistema de producción cohesionada.

Principio 8 – Utilizar todos los principios para lograr un sistema de producción de alimentos lo más sostenible posible, que se base mínimamente en los insumos de agua, energía y uso de la tierra para satisfacer las necesidades humanas y reducir las demandas y apoyar los servicios ecosistémicos (Jeavons 2001).

CBA ha demostrado una alta relación positiva de eficiencia energética principalmente de fuentes de energía renovables (Moore 2010). La reducción de los requisitos de la tierra a través de altos rendimientos tiene múltiples ventajas. Incluyen un aumento de la tenencia de la tierra, un aumento de la producción urbana y periurbana y una menor necesidad de expansión de la agricultura en los ecosistemas naturales a medida que aumentan las demandas de producción.

Mucho se ha escrito sobre la importancia de reducir la brecha de rendimiento con enmiendas inorgánicas y/o orgánicas, pero también hay desafíos con el uso de estas enmiendas (Epule 2015). Los fertilizantes sintéticos y orgánicos pueden ser caros y difíciles de adquirir. Conllevan costes ambientales en su producción, transporte y aplicación. Además, los fertilizantes sintéticos y orgánicos pueden reducir la soberanía alimentaria mediante la creación de dependencia de insumos externos o importados. Muchos citan que sólo los fertilizantes inorgánicos pueden reducir completamente la brecha de rendimiento (Epule 2015). Epule argumenta que las fuentes de fertilidad orgánica no pueden sostener los rendimientos y no son suficientes para una nueva revolución agrícola africana.

CBA puede ofrecer un enfoque holístico al enigma de "alimentar a la gente y salvar el planeta". Este sistema es especialmente adecuado para las granjas de pequeños propietarios. A nivel mundial, el 84% de las granjas son ≤ 2 ha. 72% de ellos ≤ 1 ha(Lowder 2016). Los datos de la FAO indican que 1.500 millones de personas que viven en hogares de pequeños agricultores en países de bajos ingresos suministran alimentos a 2.500 millones de personas (FAO 2012), lo quepone de relieve su potencial para impactar en el suministro de alimentos.

En África y en otras parcelas de demostración, CBA ha demostrado la capacidad de mejorar los rendimientos de los cultivos de manera sostenible y aumentar la soberanía alimentaria global (Omondi 2014, Jeavons 2001, Rajbhandari 2011). CBA está diseñado para maximizar los rendimientos y reducir el área necesaria para producir una dieta completa y sostenible, mientras que se basa en pocos o cualesquiera insumos procedentes más allá de la propia granja. Con el énfasis de CBA en la fertilidad de "bucle cerrado" para minimizar las pérdidas de nutrientes del suelo y la menor necesidad de insumos anuales de fertilizantes, su método de agricultura esapropiado para la gran diversidad de pequeñas granjas.

Este experimento fue diseñado para probar el efecto de una aplicación única de fertilizantes orgánicos utilizando prácticas CBA sobre la fertilidad del suelo y los rendimientos de cultivos y residuos durante un período de cuatro años en cuatro lugares en Kenia.

**Métodos y materiales**

Selección de granjas

Cuatro agricultores kenianos de CBA participaron en este estudio, incluyendo y dirigido por Samuel Nderitu, fundador y director del Grow Biointensive Agricultural Center of Kenya (G-BIACK) y un destacado líder, profesor y practicante con 13 años de experiencia en CBA. Las cuatro granjas participantes se encontraban en la provincia central de Kenya. Los caracteristics de la granja se muestran en la Tabla 1. Las fincas tenían una altitud media de 1488 ± 38 metros.

**Tabla 1**. *Ubicación,* comparación *climática y tipo* de suelo en cada uno de los cuatro sitios de prueba en *Kenia.*

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Granja** | **Ubicación** | **Latitud****Longitud** | **Clima** | **Anual****Precipitación** **(mm)** | **Temperatura media**  **anual.****(Co)**  | **Textura del suelo** |
| Athi Gravedad | Kilmambogo | S 1o 2' 58"Y 37el 6' 56" | Semiárido | 780 | 21.3 | Arcilla silty |
| G-BIACK | Thika | S 1o 4' 4"Y 37el 10' 23" | Semiárido | 800 | 21.3 | Loam de limo |
| Muruka | Muranga | S 0o 56' 11"E 37el 3' 58" | Sub-húmedo | 1164 | 20.4 | Arena loamy |
| Río Thika | Thika | S 1o 3' 26"Y 37el 9' 28" | Semiárido | 800 | 21.0 | Arcilla silty |

Método de experimento

Cada granja creó 10 camasnuevas, cada una de 1,52 metros por 6,1 metros, o 9,3 m2 (100 pies2),rodeada por un camino de 45 cm. El cultivo profundo se logró utilizando el método de doble excavación(Jeavons 2001, Jeavons 2017). Durante cada uno de los cuatro años, de 2012 a 2015, el suelo de cada una de las camas fue muestreado (ver material suplementario del suelo) anualmente y enviado a los Servicios de Laboratorio Nutricional de Cultivos (cropnuts.com, Parque Mashiara, Kaptagat Road, Loresho, Nairobi, Kenia) para su análisis. Crop Nutritional Laboratory Services fue seleccionado como laboratorio analítico debido a suestado de acreditación ISO-17025, ubicación y recomendación de John Recha, Especialista en Investigación de Acción Participativa, Programa de Investigación del CGIAR sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS). Todas las extracciones fueron hechas por Mehlich III. Los niveles B, Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, P, K, Na, S y Zn fueron determinados por espectroscopia plasmática inductivamente acoplada (ICP), pH y EC se determinaron potenciométricamente, y la materia orgánica se determinó colorimétricamente. No se probaron propiedades adicionales del suelo.

Los resultados iniciales de las pruebas de suelo fueron revisados por Timberleaf Soil Testing (timberleafsoiltesting.org, 39648 Old Spring Rd., Murrieta, CA 92563) y las recomendaciones para la aplicación de fertilizantes orgánicos basados en los resultados de las pruebas de suelo (Tabla 3) fueron finalizadas por Grow Your Soil (growyoursoil.org, P.O. Box 4095, Ithaca, NY 14852).

Inmediatamente antes de la plantación de los cultivos de la primera temporada, se añadieron los fertilizantes orgánicos y compost recomendados. A los suelos ácidos, primero se añadió cal y se añadieron los fertilizantes y compost recomendados adicionales un mes más tarde. El sulfato de yeso y/o cobre, si es necesario, se añadieron antes de la segunda temporada de siembra debido a la dificultad para adquirirlos antes de la primera temporada de siembra. Después de aplicar los insumos, los cultivos se plantaron inmediatamente utilizando espaciado estrecho y offset recomendado por CBA (Jeavons 2017) (Cuadro 2). En la primera temporada del primer año, cada granja creció 4 camas de maíz, 2 camas de sorgo y 1 cama cada una de amaranto, caupí, lablab y papas (Tabla 2). Para todas las estaciones y años posteriores, cada granja creció 3 lechos de maíz, 2 camas de sorgo, 2 camas de amaranto y 1 cama cada una de caupí, lablab y papas.

La selección de cultivos se basó en el objetivo de CBA de maximizar la producción nutricional y de residuos decultivos. La intención de producir maíz, sorgo y amaranto no era sólo producir cultivos que generen alimentos familiares, sino también compostar material para mantener y aumentar los niveles de materia orgánica del suelo. El maíz proporciona el 65% del total de ingesta calórica de alimentos básicos y el 36% de la ingesta total de alimentos calóricos en Kenia(Mohajan 2014). Todos los cultivos se rotaron igual en los cuatro sitios, y se hizo la rotación de cultivos para que ninguna cama creciera la misma cosecha en temporadas consecutivas, con la excepción del sorgo plantado como cultivo ratoon (ver abajo). No se aplicó riego suplementario a los cultivos en ninguna de las cuatro granjasdurante este estudio de cuatro años. CBA reduce la demanda de riego a través de un estrecho espaciado vegetal para reducir la evaporación (Wallace 2003, Rockström 2003), el aumento de la materia orgánica del suelo para la retención de agua (Weil 2017, Hatfield 2013, Magdoff 2009) y la estructura profunda del suelo para aumentar la infiltraciónde agua yla capacidad de retención de agua (Baig 1999, Baig 2013).

**Tabla 2**. *Cultivares de cultivos, espaciado y poblaciones.*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Cultivo** | **Cultivar** | **Nombre científico** | **Espaciado (cm)** | **Plantas/9,3 m2**  **\*****Plantas/(ha) \*\*** |
| Amaranto |  Vegetal (OP) | *Amaranthus tricolor* | 15.2 | 621 (481,395) |
| caupí |  Semilla blanca (OP) | *Vigna unguiculata* | 30.5 | 159 (123,256) |
| Lablab |  Negro (OP) | *Laboratorio*  morado | 30.5 | 159 (123,256) |
| Maíz |  Kikuyu (OP) | *Zea puede* subsp. *mayos* | 38.1 | 84 (65,116) |
| Sorgo |  Cuadrícula (OP) | *Bicolor de sorgo* | 17.8 | 432 (334,884) |
| Papas |  Bungoma (OP) | *Patatas Ipomoea* | 22.9 | 248 (192,248) |

OP = Abierto polinizado, un principio de CBA para una mayor soberanía de semillas.

\* Jeavons (2017)

\*\* La conversión a plantas por ha incluye un camino de 45 cm alrededor de cada cama de 9,3 m2. Esto es conservador, ya que los agricultores pueden reducir su área de camino mediante la creación de camas más largas para aumentar su espacio de cultivo por área de la unidad.

Después de esta aplicación inicial de fertilizante orgánico, los cuatro agricultores gestionaron sus 10 camas utilizando CBA para retener y reciclar la mayor cantidad posible de nutrientes del suelo. No más del 10% de la cosecha se vendió fuera de lagranja; el resto se consumió en la granja, y todos los residuos de cultivo fueron compuestos eficientemente en el lugar y devueltos al suelo. En este estudio, utilizamos todos los residuos de cultivo para crear pilas de compost CBA añadiendo 2 volúmenes de material marrón (cigüeñas, paja, etc.), 2 volúmenes de verde (material vegetal de corte fresco) y 1/4 de volumen de suelo con el fin de crear una relación inicial de carbono a nitrógeno que oscila entre 30 y 45:1. El compost CBA generalmente se entrega sólo una vez para fomentar un compostaje más lento para retener más nitrógeno, carbono y generar compost curado más general(Haug 1993, Larsen 2000, Eiland, 2001, Tiquia 2002, Zhang 2020). Esto resulta en compost basado en hongos que conserva muchos de los nutrientes originales (Barrington 2002, WSU 2019, Jeavons 2001, Man 2015). El compost curado que se generó no fue probado antes de ser añadido de nuevo a estos suelos. Since el compost se compone sólo de cultivos cultivados en estos suelos, no esperaríamos que se añadan nutrientes adicionales sustanciales más allá de lo que el suelo ya contenía.

Los cultivos se cosecharon manualmente, se pesaron inmediatamente y se registraron rendimientos. En este experimento, el sorgo fue un cultivo en todos los sitios durante los años 2, 3 y 4, lo que significa que después de la siembra del primer año, se permitió que el sorgo se regenerar en lugar de ser replantado. Los resultados de lablab y caupí se vieron afectados por los cambios en las prácticas de recolección que aseguraron el curso del estudio (ver sección resultados y discusiones para obtener más detalles).

**Tabla 3**. *Tasas de aplicación de fertilizantes aplicadas por sitio antes de la temporada 1 del primer año a menos que se especifique lo contrario.*

|  |  |
| --- | --- |
| SueloEnmienda | Tasa de explotación y aplicación por 9,3 metros cuadrados (por hectárea) |
| G-BIACK | Athi Gravedad | Río Thika | Muruka |
| Estiércol de caupí compuesto\* | Capa de 1,25 cm0,12 m3 (125 m3) | Capa de 2,5 cm0,23 m3 (250 m3) | Capa de 2,5 cm0,23 m3 (250 m3) |  Capa de 2,5 cm0,23 m3 (250 m3) |
| lima | 0,5 kg (538 kg) | 1 kg(1.075 kg) | 1 kg (1.075 kg) | 3 kg (3.226 kg) |
| Fosfato de roca minjingu | 1 kg (1.075 kg) | 1 kg (1.075 kg) | 0,5 kg(538 kg) | 2 kg(2.151 kg) |
| Yeso\*\* | 1 kg(1.075 kg) | 1 kg(1.075 kg) | 1 kg(1.075 kg) | 1,5 kg(1.613 kg) |
| Sulfato de cobre \*\*\* | 17 g(18,3 kg) | 14 g(15,1 kg) | NingunoObligatorio | NingunoObligatorio |
|

|  |
| --- |
| \* CBA normalmente no fomenta el uso de compost a base de estiércol animal, ya que la producción animal aumenta la cantidad de tierra requerida por el agricultor para la producción completa dedieta, y el uso excesivo de estiércol animal puede conducir a un aumento del nivel de sales en el suelo. Al comienzo de este estudio, no se había producido ningún compost en la granja y sólo el estiércol de caupí compuesto estaba disponible como fuente de compost.\*\*Añadido para proporcionar sulfato adicional y calcio a los suelos sin afectar el pH. Añadido en el año 1 temporada 2 debido a la falta de disponibilidad antes de la temporada 1.\*\*\*Añadido en la temporada 2 del año 1 debido a la falta de disponibilidad antes de la temporada 1. |

 |

Métodos estadísticos

Las mediciones de rendimiento y los residuos se modelaron utilizando efectos fijos de tres vías ANOVA con la temporada, el sitio y el año como variables explicativas. Cuando se justifica, se incluyó una interacción entre año y temporada. El análisis de covarianzas (ANCOVA) se utilizó para modelar los niveles de parámetros del suelo basados en el sitio y el año. El modelo de pendientes iguales se consideró adecuado para todos los parámetros. Se utilizó una tasa de error tipo I de α = 0,05 para cada prueba y confianza. El análisis se realizó utilizando SAS 9.4 y se generaron gráficos utilizando R 3.4.4.

**Resultados**

Rendimiento comestible

Los rendimientos comestibles se resumen por año, temporada y sitio en la Figura 1 y la Tabla 4. Hay n=32 mediciones generales de rendimiento de cada cultivo: 4 años, 2 estaciones y 4 sitios. Losrendimientos anualesde los productos comestibles aumentaron para el maíz, el sorgo y las papas. Los rendimientos de amaranto y caupí no cambiaron significativamente, y los rendimientos de lablab aumentaron a lo largo de la segunda temporada del tercer año cuando se cambiaron las prácticas de cosecha. Para cultivo, año, temporada y datos del sitio, véase la Figura 1 y material suplementario: Rendimiento comestible, Rendimiento de residuos y Compost curado añadido.



**Figura 1**. *Rendimientos comestibles*  *para cada cultivo por sitio (peso de la cosecha). Los rendimientos se reportan en kilogramos por cada 9,3 metros cuadrados*  *(100 pies cuadrados)*  *por año (Y) y temporada (S).* *Las líneas indican sitios: Athi Gravity (cuadrado rojo), G-Biack* *(círculo negro),* Muruka *(triángulo verde) y Thika River (diamante azul).*

**Tabla 4**. Rendimientos comestibles - *Medios,*  *desviaciones estándar,entre paréntesis* y *medianas,*  *número inferior,*  *de*  *rendimientos comestibles para cada cultivo en función del experimento general, año, temporada y sitio.*  *Los*comestibles y*ields se reportan en kilogramos por cada 9,3 metros cuadrados.*

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | *Amaranto* | *Caupí* | *Lablab* | *Maíz* | *Sorgo* | *Papas* |
| *En general (n=32)* | 3.96 (1.19) 3.65 | 2.66 (1.79) 1.85 | 2.40 (0.67) 2.50 | 4.09 (1.15) 4.32 | 3.88 (1.70) 4.05 | 16.58 (3.96) 15.00 |
|  |  |  |  |  |  |  |   |
| *Año (n=8)* |  | *Amaranto* | *Caupí* | *Lablab* | *Maíz* | *Sorgo* | *Papas* |
|  | *Año 1* | 3.59 (1.62) 3.33 | 2.83 (1.16) 2.50 | 2.65 (0.31) 2.50 | 2.85 (1.19) 2.65 | 2.20 (1.08) 2.10 | 13.78 (1.02) 13.75 |
|  | *Año 2* | 4.28 (1.28) 4.00 | 3.19 (1.26) 2.90 | 2.85 (0.21)2.90 | 4.09 (0.75)4.38 | 3.44 (1.60) 3.13 | 15.01 (1.18) 14.75 |
|  | *Año 3* | 4.28 (1.15) 4.13 | 3.18 (2.98) 1.75 | 2.48 (0.89) 2.45 | 4.58 (0.83) 4.69 | 5.21 (1.43) 4.70 | 15.15 (0.61) 15.10 |
|  | *Año 4* | 3.70 (0.45)3.83 | 1.44 (0.24) 1.50 | 1.61 (0.19) 1.70 | 4.84 (0.70) 4.60 | 4.68 (0.89)4.43 | 22.38 (3.74) 21.75 |
|  |  |  |  |  |  |  |   |
| *Temporada (n=16)* | *Amaranto* | *Caupí* | *Lablab* | *Maíz* | *Sorgo* | *Papas* |
|  | *Temporada 1* | 3.86 (1.34) 3.45 | 2.98 (2.24)2.15 | 2.55 (0.66) 2.55 | 3.75 (1.21)4.15 | 3.78 (1.85) 3.85 | 15.64 (2.44)15.00 |
|  | *Temporada 2* | 4.06 (1.05)3.85 | 2.34 (1.18)1.85 | 2.24 (0.67) 2.20 | 4.43 (1.00) 4.59 | 3.98 (1.58)4.20 | 17.51 (4.95) 15.35 |
|  |  |  |  |  |  |  |   |
| *Sitio (n.º 8)* |  | *Amaranto* | *Caupí* | *Lablab* | *Maíz* | *Sorgo* | *Papas* |
|  | *Athi Gravedad* | 5.46 (0.87)5.85 | 3.36 (2.73)2.75 | 2.26 (0.56)2.40 | 4.38 (0.97) 4.55 | 3.38 (1.22) 3.55 | 16.16 (4.45) 14.00 |
|  | *G-BIACK* | 4.21 (0.65) 4.25 | 3.64 (1.71)4.55 | 2.43 (0.66)2.45 | 4.91 (0.91) 4.90 | 5.62 (1.66)6.03 | 17.20 (3.86)15.50 |
|  | *Muruka* | 2.93 (0.65) 3.05 | 1.59 (0.36)1.73 | 2.34 (0.75) 2.70 | 3.12 (1.15) 2.97 | 2.71 (1.33) 2.93 | 15.78 (3.23) 14.85 |
|  | *Río Thika* | 3.25 (0.46)3.43 | 2.03 (0.60)2.13 | 2.56 (0.78) 2.95 | 3.95 (0.87)4.15 | 3.81 (1.22) 3.85 | 17.18 (4.73) 15.70 |

Análisis estadístico de los rendimientos comestibles

Se llevó a cabo un ANOVA de efectos fijos de tres vías para comparar los rendimientos de cada uno de los seis cultivos en función de los principales efectos del año, la temporada y el sitio (Cuadro 4). Los añosfueron codificados cuantitativamente como 1, 2, 3 y 4 durante los cuatro años del experimento; las temporadassfueron codificadas cuantitativamente como 1 y 2 para la primera y segunda temporadas de crecimiento de cada año. No se encontraron interacciones significativas en parejas o de tres vías para ningún cultivo, por lo que sólo se consideraron los modelos con efectos principales. Las prácticas de recolección de caupí y lablab se cambiaron a partir de la segunda temporada del tercer año con el fin de favorecer los rendimientos de los residuos sobre los rendimientos comestibles, por lo que estos cultivos que hemos modelado por separado para el período de cosecha favoreciendo los rendimientos comestibles (HE) y para el período de cosecha favoreciendo los rendimientos de residuos (HR). Consulte la sección Discusión para obtener más información. Además, un modelo para evaluar los cambios en el rendimiento basados en la práctica de cosecha era apto para caupí y lablab que también controlaba las diferencias en el sitio, el año y la temporada.

Comparación anual - Si se encontraron aumentos de rendimiento (pendientes positivas o valores β) durante el período de tiempo de este estudio para maíz, papas y sorgo [respectivamente (β = 0,64, t (26) = 8.04, p < 0.0001), (β = 2.59, t (26) = 6.31, p < 0.0001), (β = 0.92, t (26) = 6.98, p < 0.0001)]. Los rendimientos de amaranto no cambiaron significativamente durante el estudio (β = 0,03, t(26) = 0,29, p = 0,7720). Los rendimientos de caupí no cambiaron significativamente para ninguna de las prácticas de cosecha (HE: β = 0.932, t (14) = 1.96, p = 0.0702, HR: β = –0.05, t (6) = –0.51, p = 0.6278). El rendimiento de caupí difirió significativamente entre los dos períodos de cosecha (HE y HR) en 3,18 kg/9,3m2 más, en promedio, durante HE (IC del 95% para Diff = HE - HR: 0,84, 5,53). Los rendimientos de Lablab aumentaron significativamente durante la práctica inicial de cosecha (HE: β = 0,33, t (14) = 4,73, p = 0,0003), pero los rendimientos de lablab no cambiaron significativamente durante el resto del estudio (HR: β = –0,075, t (6) = –0,63, p = 0,5499). Los rendimientos de Lablab fueron significativamente mayores durante el período de cosecha favoreciendo los rendimientos comestibles en un promedio de 1,65 kg/9,3m2 más durante HE (IC del95% para Diff = HE - HR: 1,23, 2,08).

Comparación estacional - Los rendimientos del maíz se vieron significativamente afectados por la temporada en que se cultivaron (β = 0,68, t (26) = 3,80, p = 0,0008), y los rendimientos de las papas se vieron afectados marginalmente (β = 1,89, t (26) = 2,03, p = 0,0523), probablemente debido a la diferencia de precipitación entre las dos estaciones (no se proporcionó ningún riego adicional). Amaranto, lablab, sorgo y caupí, sus rendimientos no se vieron significativamente afectados por la temporada.

Comparación del sitio - Maíz, sorgo, amaranto, caupí (durante los períodos HE y HR), y lablab (durante el período HE) rendimientos también fueron significativamente diferentes entre los sitios [respectivamente, (F (3,26) = 17.76, p < 0,0001), (F (3,26) = 17,82, p < 0,0001), (F (3,26) = 21,81, p < 0,0001), (HE: F (3,14) = 4,91, p = 0,0155; HR: F (3,6) = 7.70, p = 0.0176), (ÉL: F (3,14) = 4.08, p = 0.0281]. Taquí no se detectó ningún efecto significativo en el sitio para lablab durante el período HR (HR: F (3,6) = 1,98, p = 0. 2184) o batata (F (3,26) = 0,62, p = 0,6107).

Puede encontrarse un resumen del análisis bidireccional de la varianza en los rendimientos comestibles de los cultivos para cada cultivo en materiales suplementarios: Resumen del análisis de tresw ayde la varianza en el rendimiento de los cultivos (ANOVA).

Rendimiento de residuos (biomasa no comestible sobre el suelo)

Los rendimientos de residuos de cultivos en este estudio se resumen por año, temporada y sitio en la Figura 2 y la Tabla 5. Dado que no se registraron rendimientos de residuos en la primera temporada del primer año, el número total de observaciones para cada cultivo fue n=28. Los rendimientos anuales de residuos aumentaron para las papas, aumentaron marginalmente para amaranto, maíz y sorgo durante algunas estaciones, y aumentaron marginalmente durante algunos períodos de tiempo para el caupí y lablab. Para datos de cultivo, año, temporada y sitio, véase la Figura 2 y materiales suplementarios: Análisis del rendimiento de residuos de cultivo SAS Output.



**Figura 2**. *Rendimientos de residuos*  *para cada cultivo (peso de cosecha) por sitio reportados en kilogramos por 9,3 metros cuadrados*  *(100 pies cuadrados)por año (Y) y temporada (S). Las líneas indican sitios: Athi Gravity (cuadrado rojo), G-Biack* *(círculo negro),* Muruka *(triángulo verde) y Thika River (diamante azul).*

|  |  |
| --- | --- |
|  | **Tabla 5**. Materia residual - *Medios,*  *desviaciones estándar,*  *entre paréntesis,* y *mediana,* *númeroinferior,* de materia residual para cada cultivo basado en experimento *general, año, temporada y sitio. La materia residual se reporta en kilogramos por cada 9,3 metros cuadrados.* |
|  |  | *Amaranto* | *Caupí* | *Lablab* | *Maíz* | *Sorgo* | *Papas* |
| *Total (n=28)* | 18.71 (5.55) 19.75 | 4.24 (2.04)4.30 | 5.05 (2.76)4.05 | 51.59 (12.40) 54.50 | 25.68 (9.54) 25.13 | 6.49 (3.87) 5.30 |
|  |  |  |  |  |  |  |   |
| *año* |  | *Amaranto* | *Caupí* | *Lablab* | *Maíz* | *Sorgo* | *Papas* |
|  | *Año 1(n=4)* | 15.93 (4.36) 15.78 | 2.98 (2.04)2.15 | 3.35 (0.54)3.20 | 49.32 (14.12) 53.95 | 22.74 (9.46)21.63 | 6.10 (2.02) 6.10 |
|  | *Año 2(n=8)* | 17.81 (5.66) 17.88 | 3.23 (1.94) 2.80 | 3.39 (0.38) 3.35 | 51.57 (13.61) 54.42 | 24.64 (9.27) 23.40 | 4.05 (2.88) 2.95 |
|  | *Año 3(n=8)* | 18.90 (5.43) 18.80 | 4.26 (1.92) 4.10 | 4.83 (1.14) 4.55 | 52.29 (13.46) 54.55 | 25.11 (9.52) 23.48 | 5.08 (2.97) 3.95 |
|  | *Año 4**(n=8)* | 20.82 (6.22) 21.20 | 5.85 (1.35) 5.95 | 7.80 (3.78) 6.40 | 52.06 (11.74)53.65 | 28.76 (10.88) 26.40 | 10.55 (3.28) 10.40 |
|  |  |  |  |  |  |  |   |
| *Temporada* |  | *Amaranto* | *Caupí* | *Lablab* | *Maíz* | *Sorgo* | *Papas* |
|  | *Temporada 1(n=12)* | 18.05 (5.10) 17.88 | 3.98 (2.00) 3.55 | 5.27 (3.38) 4.00 | 50.84 (13.07) 54.50 | 25.10 (9.21) 23.28 | 6.26 (3.98) 5.20 |
|  | *Temporada 2(n=16)* | 19.21 (5.99) 19.75 | 4.43 (2.12) 4.85 | 2.89 (2.30) 4.35 | 52.16 (12.29) 54.37 | 26.11 (10.05) 25.55 | 6.67 (3.90) 6.10 |
|  |  |  |  |  |  |  |   |
| *Sitio (n.º 7)* |  | *Amaranto* | *Caupí* | *Lablab* | *Maíz* | *Sorgo* | *Papas* |
|  | *Athi Gravedad* | 23.69 (1.45) 24.05 | 4.27 (2.25) 3.00 | 4.29 (1.11) 4.10 | 54.41 (0.79) 54.60 | 21.69 (2.59) 21.90 | 4.76 (2.62) 3.30 |
|  | *G-BIACK* | 22.88 (4.57) 22.75 | 6.47 (0.84) 6.30 | 6.77 (4.93) 4.00 | 65.78 (2.95) 66.83 | 39.56 (4.52) 38.85 | 10.46 (2.93) 9.70 |
|  | *Muruka* | 13.03 (3.00) 12.75 | 2.60 (1.56) 1.60 | 4.70 (1.86) 3.70 | 33.01 (4.70) 32.50 | 15.77 (4.84) 14.25 | 5.00 (3.73) 4.30 |
|  | *Río Thika* | 15.24 (2.40) 14.40 | 3.60 (1.09) 3.00 | 4.46 (0.77) 4.10 | 53.17 (3.39) 54.40 | 25.69 (0.89) 25.70 | 5.76 (3.59) 4.10 |

Análisis estadístico de los rendimientos de residuos de cultivos

Se utilizó un modelo completo que incluía todas las interacciones en parejas y la interacción de tres vías para determinar si incluir términos de interacción para amaranto, maíz, sorgo y papas. Sobre la base de este análisis, los modelos ANOVA de tres vías con una interacción año por temporada eran aptos sólo para maíz, sorgo y amaranto. Sólo los principales efectos que se consideran para las papas. Debido a los cambios en las prácticas de recolección de cáscaras de caupí y lablab (ver sección discusión para más detalles), se realizaron análisis similares para los rendimientos de residuos de caupí y lablab como se describe en la sección Rendimientos comestibles de los Resultados. Con los grados reducidos de libertad, un modelo con efectos principales sólo era apto para caupí y lablab tanto para los períodos HE como para HR. Además, un modelo para evaluar los cambios en el rendimiento basados en la práctica de cosecha era apto para caupí y lablab que también controlaba las diferencias en el sitio, el año y la temporada. Véase material suplementario-Resumen de tres w ayAnálisis de varianza sobre rendimiento de cultivo (ANOVA).

Comparación anual – Los rendimientos de las papas (β = 2,02, t (22) = 4,27, p = 0,0003) aumentaron significativamente, según lo indicado por una estimación positiva de la pendiente asociada con el año (β) a lo largo de los años de este estudio en los modelos que también contabilizaron los principales efectos de la temporada y elsitio. Efectos principales marginalmente significativos del año en los rendimientos del maíz (F (F (1,21) = 3,13, p = 0,0914) y amaranto (F (1,21) = 4,02, p = 0,0580) se detectaron con la presencia de interacciones significativas año por temporada ((F (1,21) = 5,23, p = 0,0327), (F (1,21) = 11,13, p = 0,0031), respectivamente), lo que sugirió que los efectos del año variaron negativamente en la temporada 1 y positivamente en la temporada 2. El sorgo no tuvo un cambio significativo en el rendimiento basado en el efecto principal del año en presencia de una interacción significativa entre año y temporada (F(1,21) = 5,76, p = 0,0258), lo que sugirió efectos positivos en el año general para ambas temporadas. Los rendimientos de caupí no cambiaron significativos durante el período HE (HE: β = 0,10, t (14) = 0,46, p = 0,6523) y aumentaron marginalmente durante el período de RRHH (HR: β = 0,68, t (6) = 2,19, p = 0,0712). Los rendimientos de caupí difieren significativamente entre los dos períodos de cosecha en 2,03 kg/9,3m2 más, en promedio, durante hr (IC del 95% para Diff = HR - HE: 0,83, 3,23). Los rendimientos de Lablab aumentaron marginalmente durante el período HE (ÉL: β = 0,39, t (14) = 2,19, p = 0,0536) y no mostraron ningún cambio significativo durante el período de RRHH (HR: β = 1,35, t (6) = 1,01, p = 0,3504). Los rendimientos de Lablab difieren marginalmente entre los dos períodos de cosecha en un promedio de 2,99 kg/9,3m2 más durante HR (IC del95% para Diff = HR - HE: –0,33, 6,32).

Comparación estacional – Los rendimientos de Amaranto también se asociaron significativamente con la temporada (F (1,21) = 5,49, p = 0,0290) en presencia de una interacción significativa con el año. No se detectó ningún efecto de temporada significativo para los cultivos de caupí, lablab, maíz, sorgo, lablab o papas.

Comparación del sitio - Con excepción del lablab durante el período HE, t aquí fue evidencia convincente de un efecto de sitio en la materia residualen los otros 5 cultivos (p < 0.01 para todos).

Un resumen del análisis bidireccional de la varianza en los rendimientos de residuos de cultivos para cada cultivo se puede encontrar en material suplementario: Resumen del análisis de tres w aydevarianza en el rendimiento de residuos de cultivo (ANOVA).

Respuestas a parámetros del suelo

Los niveles de catorce parámetros del suelo se midieron en cada sitio durante cuatro años. El boro, la conductividad eléctrica, el magnesio, la materia orgánica, el fósforo, el potasio, el azufre y el zinc aumentaron significativamente. Calcium, cobre, hierro, pH y sodio no mostraron cambiossignificativos, y los niveles de manganeso disminuyeron significativamente. Consulte la Figura 3 y la Tabla 6 para obtener datos de sitio y año. Orangos ptimal de parámetros del suelo se pueden ver en material suplementario: Rangos ideales de parámetros del suelo.

|  |
| --- |
| **Aumento significativo** |
| **Sin cambios significativos**    |
| **Disminuyó significativamente** |

**Figura 3.** *Parámetros del suelo para cada sitio por año categorizados por aumento estadístico, sin*  *cambios y disminución. Las líneas indican sitios: Athi Gravity (cuadrado rojo), G-BIACK (círculo negro),* Muruka *(triángulo verde) y Thika River (diamante azul).*

**Tabla 6**. *Desviación media* yestándar*, entre paréntesis,* de los niveles de parámetros *del* suelo para cada año y durante todo *el estudio.*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | ***Año 1(n=4)*** | ***Año 2(n=4)*** | ***Año 3(n=4)*** | ***Año 4(n=4)*** | ***Total(n=16)*** |
| ***Boro (ppm)*** | 0.48 (0.05) | 0.54 (0.19) | 0.76 (0.35) | 1.12 (0.19) | 0.72 (0.33) |
| ***Calcio (ppm)*** | 3273.75 (1672.05) | 4065.00 (1759.67) | 4710.00 (2570.56) | 4490.00 (1077.87) | 4134.69 (1747.35) |
| ***Cobre (ppm)*** | 2.56 (2.08) | 1.43 (0.82) | 1.79 (1.62) | 1.80 (0.91) | 1.89 (1.37) |
| ***Conductividad eléctrica (μS/cm)*** | 191.75 (141.34) | 311.00 (164.98) | 452.00 (357.62) | 1070.50 (700.6) | 506.31 (505.23) |
| ***Hierro (ppm)*** | 240.00 (114.34) | 217.88 (153.13) | 273.60 (161.87) | 374.00 (102.69) | 276.37 (135.86) |
| ***Magnesio (ppm)*** | 557.25 (232.78) | 575.75 (173.78) | 722.50 (376.57) | 851.50 (209.94) | 676.75 (263.22) |
| ***Manganeso (ppm)*** | 297.25 (137.57) | 176.98 (102.59) | 144.65 (120.15) | 125.00 (17.42) | 185.97 (116.65) |
| ***Materia orgánica (%)*** | 2.78 (0.55) | 3.37 (0.57) | 3.19 (0.42) | 3.63 (0.42)  | 3.24 (0.55) |
| ***Ph*** | 6.15 (0.70) | 6.93 (0.35) | 6.63 (0.96) | 6.90 (0.57) | 6.65 (0.69) |
| ***Fósforo (ppm)*** | 35.25 (24.92) | 129.85 (78.77) | 387.43 (628.48) | 449.20 (349.02) | 250.43 (369.45) |
| ***Potasio (ppm)*** | 475.50 (44.28) | 612.00 (144.56) | 850.50 (394.41) | 1552.50 (540.21) | 872.63 (526.89) |
| ***Sodio (ppm)*** | 180.75 (128.73) | 144.68 (42.28) | 319.25 (82.20) | 210.50 (61.67) | 213.79 (101.58) |
| ***Azufre (ppm)*** | 22.50 (11.39) | 22.43 (9.29) | 26.80 (21.80) | 99.55 (43.22) | 42.82 (40.74) |
| ***Zinc (ppm)*** | 7.72 (4.38) | 9.90 (2.59) | 19.36 (15.80) | 18.58 (7.65) | 13.89(9.75) |

Análisisstical de Stati de las respuestas a los parámetros del suelo

Para cada uno de los parámetrosdelsuelo, ANCOVA se utilizó para modelar los niveles de parámetros del suelo en función de las diferencias en el sitio y el año. En el nivel α= 0,05, el modelo de pendientes iguales se consideró adecuado para todos los nutrientes.

Se detectaron aumentos anuales positivos significativos en boro, conductividad eléctrica, magnesio, materia orgánica, fósforo, potasio, azufre y zinc (Tabla 7). Se detectaron niveles significativamente decrecientes para el manganeso y no se detectaron cambios significativos en el calcio, el cobre, el hierro, el pH y el sodio (Tabla 7). Los detalles completos del modelo están disponibles en el material suplementario: Soil Parameter Analysis SAS Output.

|  |
| --- |
| **Tabla 7.** *Pendientes* yerror *estándar,* *entre paréntesis,* *asociados con modelos de pendientes iguales para cada* *parámetro de suelo,* *estadísticas de prueba, valores p de dos lados e intervalos de confianza del 95%.* |
|   | ***Pendiente*** ***(error estándar)*** | ***t (8)*** | ***P*** | ***Intervalo de confianza del 95%*** |
| ***Límite inferior*** | ***Límite superior*** |
| ***Boro*** | 0.21 (0.05) | 4.73 | 0.0006 | 0.11 | 0.31 |
| ***Calcio*** | 429.38 (239.23) | 1.79 | 0.1002 | –97.17 | 955.92 |
| ***Cobre*** | –0.19 (0.32) | –0.59 | 0.5662 | –0.91 | 0.52 |
| ***Conductividad eléctrica*** | 277.73 (70.21) | 3.96 | 0.0023 | 123.20 | 432.25 |
| ***Hierro*** | 45.77 (27.47) | 1.67 | 0.1239 | –14.69 | 106.24 |
| ***Magnesio*** | 102.95 (38.05) | 2.71 | 0.0205 | 19.20 | 186.70 |
| ***Manganeso*** | –54.91 (21.46) | –2.56 | 0.0266 | –102.15 | –7.67 |
| ***Materia orgánica*** | 0.24 (0.07) | 3.35 | 0.0064 | 0.08 | 0.39 |
| ***Ph*** | 0.20 (0.12) | 1.66 | 0.1261 | –0.06 | 0.46 |
| ***Fósforo*** | 149.94 (62.70) | 2.39 | 0.0358 | 11.94 | 287.94 |
| ***Potasio*** | 346.95 (66.75) | 5.2 | 0.0003 | 200.04 | 493.86 |
| ***Sodio*** | 26.38 (24.16) | 1.09 | 0.2981 | –26.78 | 79.55 |
| ***Azufre*** | 23.55 (6.39) | 3.68 | 0.0036 | 9.48 | 37.62 |
| ***Cinc*** | 4.20 (1.85) | 2.28 | 0.0439 | 0.14 | 8.27 |

**Discusión**

Rendimientos comestibles

Los rendimientos comestibles de muchos de los cultivos aumentaron con respecto al año 1 y siguieron aumentando cada año (Figura4),lo quesugiere que la adición única de fertilizantes orgánicos y posteriores adiciones de compost aumentó la disponibilidad de nutrientes del suelo, lo que tuvo un efecto positivo en los cultivos. En muchos casos, la disponibilidad de nutrientes del suelo continuó aumentando en los próximos cuatro años. Esposible que el continuo aumento de la disponibilidad de nutrientes se deba al menos en parte a las prácticas de CBA en las que todos los cultivos sedevuelven al suelo y se minimiza la erosión del suelo. Utilizando CBA, los residuos se devuelven a través de compostaje eficiente y eficaz, y el suelo permanece cubierto y protegido a través de cultivos continuos y densamente plantados. Además, los nutrientes del suelo ya presentes en el suelo pueden haber estado más disponibles a través del aumento de la actividad microbiana resultante de lascontinuas adiciones de compost, así como el ajuste del pH del suelo donde las pruebas de suelo justificadas (Schimel 2012, Banwart 2019, Weil 2017). El aumento de la actividad microbiana del suelo también ayudó a inmovilizar nutrientes que de otro modo podrían haber lixiviado el ed del suelo. También es posible que la actividad biológica del suelo y la práctica CBA de preparación profunda del suelo mejoraron la estructura del suelo y permitieron un mayor acceso a nutrientes más profundos en el suelo, que luego fueron devueltos a la superficie del suelo a través del compostaje.

Basándose en los resultados de los parámetros del suelo, el sitio de Muruka tenía el suelo menos fértil (pH más bajo, nivel más alto de aluminio, segundo nivel de materia orgánica más bajo y niveles más bajos de calcio, magnesio y hierro) que generalmente se correlacionaba con tener los rendimientos comestibles y residuos más bajos. Esta tendencia no fue superada inicialmente por la aplicación única de fertilizantes orgánicos y compost solamente. Sin embargo, los rendimientos comestibles y de residuos, e incluso los niveles de parámetros del suelo sugieren que el suelo de Muruka era comparablemente fértil con los otros sitios al final de este estudio de cuatro años. Este aumento constante de la fertilidad puede deberse a los efectos combinados de una aplicación única de fertilizantes orgánicos y CBA y justifica un estudio adicional.

****

**Figura 4.**  *Rendimientos totales de cultivos comestibles en todos los sitios durante cuatro años.*

Los rendimientos de los granos de maíz aumentaron con el tiempo en todos los sitios, pero mostraron diferencias significativas en el rendimiento entre las estaciones lluviosas y secas, que se esperaban ya que no se proporcionó riego suplementario. Los rendimientos de los granos de sorgo aumentaron en promedio entre los años 1, 2 y 3, pero disminuyeron en el año 4 (Figura 1 y Cuadro 4). El sorgo ratoon normalmente disminuye en el rendimiento del grano en el año 4 y luego se replanta, correlacionándose con nuestros hallazgos. Los rendimientos del tubérculo de batata aumentaron durante este período de estudio (Figura 1, Tabla 4), aunque hubo pequeñas caídas temporales en cada sitio. Se espera un aumento de la producción de tubérculos debido al aumentode la fertilidad del suelo d, ya que la fotosíntesis del dosel se ha correlacionado significativamente con elrendimiento de t uber(Bhagsari 1990). Los rendimientos de las hojas de amaranto aumentaron on promedio entre el año 1 y 2,se estancaron en el año 3 y disminuyeron en el año 4 (Figura 1 y Cuadro 4). Esta disminución en el año 4 fue específica del sitio, y más evidente en Athi Gravity y en menor grado en G-BIACK (Figura 1). La disminución del rendimiento de las hojas en Athi Gravity y, en menor medida, en G-BIACK se atribuye a la disminución de las precipitaciones, lo que llevó a una disminución de la producción de hojas de amaranto durante el crecimiento.

Los rendimientos de lablab y caupí fueron inicialmente difíciles de interpretar, ya que se vieron afectados por un cambio en las prácticas de cosecha durante las course de este experimento. Al igual que con el amaranto, la cosecha de lablab y hoja de caupí generalmente se realiza de una manera que minimiza el daño a la salud de la planta. Sin embargo, todavía hay tasas de cosecha dentro de este parámetro que pueden aumentar el rendimiento de las hojas, pero reducir la productividad general de la planta ligeramente o reducir el rendimiento de las hojas para aumentar la productividad general y el rendimiento de residuos de la planta.

Hasta el año 3 de la temporada 1, la recolección de hojas de caupí y lablab se realizó con el objetivo de maximizar el rendimiento comestible (ya sea hoja o semilla respectivamente). Sin embargo, en la temporada 2 del año 3 y para el resto del experimento, la recolección de hojas de caupí y lablab se realizó con el objetivo de maximizar el rendimiento de residuos de cultivo y la producción de compost. Como resultado del cambio en las prácticas de recolección, las interpretaciones de los rendimientos comestibles y de residuos de caupí y lablab se dividieron en dos períodos: la recolección de rendimientos comestibles (HE) y la recolección de rendimientos de residuos (HR). Dentro de cada período de cosecha, los rendimientos comestibles de caupí no cambiaron significativamente, pero comparando entre períodos, fueron significativamente más altos durante el período HE. Los rendimientos de Lablab aumentaron significativamente durante el período HE, pero no cambiaron significativamente durante el período de recursos humanos. En comparación entre los períodos de cosecha, los rendimientos comestibles de lablab fueron significativamente más altos en el período HE. Se demostró que el método de recolección utilizado durante el período HE tuvo éxito en el aumento de los rendimientos comestibles para caupí y lablab. El efecto de este método de recolección en los rendimientos de los residuos se describe con más detalle a continuación.

Los rendimientos de las hojas de caupí de Athi Gravity fueron inusualmente altos en la temporada 3 del año 1 (Figura 1 y Tabla 4). El agricultor y los autores atribuyen este aumento del rendimiento a las lluvias estacionales afortunadas que, debido al tiempo y a la falta de disponibilidad de riego, tuvieron un efecto significativo en los rendimientos de caupí en esta región semiárida.

Los rendimientos comestibles de maíz, sorgo y papas son significativamente superiores a los rendimientos medios reportados por la FAO durante este período de cuatro años (Cuadro 8; nota: Los datos de la FAO sobre amaranto, caupí y lablab no estaban disponibles). Estos mayores rendimientos representan un 70% de increase en calorías. Latendencia del aumento de los porcentajes de diferencias de rendimiento entre la agricultura convencional y CBA se correlaciona con la tendencia de aumento de los rendimientos con CBA encontrado durante este estudio. La tendencia del aumento de los porcentajes de diferencias de rendimiento también sugiere que los aumentos se debieron a diferencias de gestión entre la agricultura convencional y la CBA en lugar de las diferencias medioambientales.

**Tabla 8.** *2012-2015 La FAO informó de* rendimientos comestibles kenianos promedio anuales en comparación con los *resultados del rendimiento comestible del estudio. (Nota: Comparación de estudio de camas convertidas a ha por cada cama total (9,3 m2)más un área de camino (3,6 m2)o 12,9 m* *2)*  *(FAOSTAT)\**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Cultivo** | **año** | **Rendimientos kenianos medios hg ha-1\*** | **Rendimientos del estudio kg/9,3m2** | **Rendimientos del estudio convertidos en kg** ha**-1** | **% Diferencia** |
| Maíz | 2012 | 17366 | 2.85 | 22093 | 27.2% |
| 2013 | 16922 | 4.09 | 31705 | 87.4% |
| 2014 | 16602 | 4.58 | 35504 | 113.9% |
| 2015 | 18230 | 4.84 | 37519 | 105.8% |
| Promedio | 17280 | 4.09 | 31705 | **83.6%** |
| Sorgo | 2012 | 7445 | 2.2 | 17054 | 129.1% |
| 2013 | 7550 | 3.44 | 26667 | 253.2% |
| 2014 | 8316 | 5.21 | 40388 | 385.7% |
| 2015 | 9667 | 4.68 | 36279 | 275.3% |
| Promedio | 8245 | 3.88 | 30097 | **260.8%** |
| Papas | 2012 | 128346 | 13.78 | 106822 | -16.8% |
| 2013 | 124706 | 15.01 | 116357 | -6.7% |
| 2014 | 125050 | 15.15 | 117442 | -6.1% |
| 2015 | 170773 | 22.38 | 173488 | 1.6% |
| Promedio | 137219 | 16.58 | 128527 | **-7.0%** |
| **Comparación promedio de todos los rendimientos comestibles en todos los sitios y años** | **112.5%** |

\*La conversión a hg/ha incluye un camino de 45 cm alrededor de cada cama de 9,3 m2. Esto es conservador, ya que los agricultores pueden reducir su área de camino mediante la creación de camas más largas para aumentar su espacio de cultivo por área de la unidad.

Los rendimientos de los granos de maíz aumentaron constantemente y fueron del 27,2%, 87,4%, 113,9% y 105,8% superiores a los rendimientos medios reportados por la FAO en los años 1 a 4 respectivamente (Cuadro 8). Dado que no se gestionaron camas de control con CBA que no recibieron la aplicación única de fertilizantes orgánicos, no podemos atribuir este rendimiento a los fertilizantes, al método CBA o ambos. Sin embargo, Omondi et al. (2014) encontraron rendimientos sustanciales más altos de maíz cultivado con CBA utilizando el mismo espaciado (131.800 hg ha-1). Si bien la inclusión del espacio del pasillo y los rendimientos de camas enteras pueden reducir un poco la estimación del rendimiento, coincide con el alto potencial de rendimiento de CBA para el maíz cultivado en Kenia.

Rendimientos de residuos

Los rendimientos de los residuos de maíz aumentaron ligeramente en general (Figura 5), pero sus diferentes variedades variaron con aumentos en G-BIACK y Muruka, ligero aumento en Athi Gravity y respuestas variables en Thika River (Figura 2). Si bien es de esperar aumentos en los rendimientos de residuos de maíz que corresponden a aumentos en los rendimientosde granos de maíz en respuesta al aumento de la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nitrógeno(Sindelar 2012), tanto Athi Gravity como Thika River experimentaron alojamiento de los cultivos de maíz cada año debido a las fuertes lluvias y vientos. Los rendimientos de residuos de sorgo aumentaron durante este período de estudio. Que los rendimientos de los residuos no disminuyeron en Athi Gravity y Thika sugiere sorgo was menos propenso a alojamiento queel maíz. Los rendimientos de los residuos de batata aumentaron a pesar de que cada sitio experimentó pequeñas caídas (Figura 2 y Tabla 5) en el transcurso de este estudio, que se espera que aumente la fertilidad del suelo.

****

**Figura 5.** *Rendimientos totales de cultivos residuales en todos los sitios durante cuatro años*

Los rendimientos de residuos de amaranto aumentaron constantemente durante este período de estudio, a pesar de la disminución de las precipitaciones y el rendimiento de las hojas en el año 4. Esto se debe a dos factores: 1) las hojas de amaranto verde se cosechan cuando son jóvenes y tiernas, y a un ritmo para minimizar el damage a la salud de la planta amaranto, que se basa en gran medida en la experiencia del agricultor y requiere un juicio significativo; y 2) la mayor parte del peso total de una planta de amaranto maduro en la cosecha se puede atribuir a sus pesados tallos y muy poco a las hojas secas restantes. Es probable que la falta de lluvia en Athi Gravity y G-BIACK redujera las tasas de recolección de hojas de amaranto, sin embargo, no hubo descensos generales, sino aumentos en los rendimientos de los residuos.

Debido al cambio en las prácticas de recolección de caupí y lablab descritos anteriormente, interpretamos los rendimientos de residuos de caupí y lablab dentro y entre estos dos períodos de cosecha (HE y HR). Los rendimientos de caupí no cambiaron significativamente durante el período HE y aumentaron marginalmente durante el período de recursos humanos. Los rendimientos de Lablab aumentaron marginalmente durante el período HE y no mostraron ningún cambio significativo durante el período de recursos humanos. Sin embargo, tanto los rendimientos de residuos de caupí como los de lablab fueron mayores en el período de recursos humanos. El método de recolección utilizado durante el período de recursos humanos logró aumentar los rendimientos de residuos para caupí y lablab. En general, las prácticas de recolección utilizadas en los períodos he y hr tuvieron éxito en el aumento de los rendimientos comestibles o residuales, respectivamente, para caupí y lablab, pero el aumento de los rendimientos comestibles se produjo a costa de la disminución de los rendimientos residuales y viceversa. Alterar los métodos de cosecha de estos cultivos puede aumentar los rendimientos comestibles y la producción nutricional humana. Sin embargo, este enfoque probablemente sólo proporciona una ventaja a corto plazo, ya que una disminución en los rendimientos de los residuos y la producción de compost en la granja podría conducir a una disminución de la materia orgánica del suelo y a una pérdida de fertilidad general si se utiliza continuamente durante varios años.

Los aumentos combinados de residuos de cultivos llevaron a que cada sitio pudiera aplicar 0,073 m3 de compost a cada cama durante ambas estaciones del cuarto año, en lugar de 0,049 m3 que se habían aplicado por cama en temporadas y años anteriores. Elaumento del material de compost se reflejó en el aumento significativo de la materia orgánica del suelo en todos los sitios a lo largo de este estudio de cuatro años. Este aumento demuestra la capacidad de CBA, combinada con una aplicación única de fertilizantes orgánicos, para mejorar la fertilidad del suelo y ayudar a mitigar el cambio climático. Además, este aumento sugiere que los niveles de materia orgánica del suelo podrían seguir aumentando más allá del período de cuatro años de este estudio.

Respuestas a parámetros del suelo

En el transcurso de este estudio, no hubo una disminución significativa en 13 de los 14 parámetros del suelo en general. El único parámetro del suelo que disminuyó significativamente fue el manganeso (Figura3 y Tabla 7). La disminución del manganeso puede deberse a las lluvias estacionales que redujeron el oxígeno disponible en el suelo, haciendo que el manganeso se volviera más móvil, en combinación con la adsorción débil por materia orgánica, la principal fuente de adsorción de cationes en estos suelos. El manganeso es la disminución más débil por materia orgánica, con la excepción del magnesio, pero la movilidad del magnesio no se incrementa en condiciones de reducción (Mengel 2001). Además, los niveles de manganeso en estos suelos fueron excesivos en el año 1 (media de 297,25 ppm) con niveles ideales de manganeso de mehlich IIextracciones que van de 20 a 250 ppm y todavía eran moderadamente altos en el año 4 (media de 125 ppm) (ver materiales suplementarios: Parámetros ideales del suelo).

Los niveles de fósforo, potasio, materia orgánica, azufre, magnesio, boro, zinc y conductividad eléctrica aumentaron significativamente con respecto a este estudio (Tabla 7). Laaplicación única de fertilizantes orgánicos incluyó nutrientes necesarios para estos suelos, así como cal que aumentó el pH del suelo y podría haber hecho algunos nutrientes más disponibles. También es posible la combinación de nutrientes necesarios, optimización de pH, y la adición de compost permitió a la biología del suelo aumentar aún más la disponibilidad de nutrientes del suelo a través de la movilización y disminuir las pérdidas de nutrientes a través de la inmovilización. Todavía se esperarían pérdidas de este sistema a través de la lixiviación, volatilización y erosión, así como la falta de nutrientes de reciclaje contenidos en los desechos humanos de quienes consumieron los cultivos. Further investigación es necesaria para determinar el punto en el tiempo cuando esas pérdidas son mayores que las cantidades de nutrientes añadidos a través de procesos biogeoquímicos.

Mientras que un aumento constante del fósforo se puede explicar a través de la descomposición continua del fosfato de roca añadido antes de la temporada 1 y el aumento de la actividad microbiana, el aumento del fósforo en G-BIACK en el año 3 (Figura 3) es anómalo. Al recibir los resultados de la prueba ese año, el laboratorio volvió a probar los resultados a petición y encontró un nivel P igualmente alto. Dado que no se había añadido ningún fertilizante que contenga fósforo, es posible que esto se deba a una distribución desigual del fosfato de roca antes de la temporada 1 año 1 y la inhomogeneidad de la muestra en el año 3.

Los niveles de azufre (específicamente sulfato) aumentaron constantemente en el transcurso de este estudio e incluso más rápido en el año 4. Los niveles de sulfato del suelo son altamente variables incluso en el transcurso de una temporada de crecimiento (Bloem 2001), pero también están directamente correlacionados con la actividad microbiana del suelo (Kersetz 2004). El aumento del sulfato en el año 4 podría atribuirse a la lenta disolución del yeso, combinado con el aumento constante de la materia orgánica del suelo, lo que llevó al aumento del sulfato total en el suelo y a una mayor actividad microbiana y disponibilidad de sulfato.

Grow Biointensive Sustainable Agriculture es un sistema de producción de alimentos que no requiere maquinaria, minimiza la necesidad de insumos externos, y se ha demostrado que mejora significativamente los rendimientos (Jeavons 2001, Rajbhandari 2011, Omondi 2014) convirtiéndolo así en un sistema disponible y ventajoso para casi cualquier agricultor del mundo. Sin embargo, si los agricultores son incapaces de probar su suelo y agregar fertilizantes orgánicos recomendados, deben conformarse con rendimientos de cultivos que, aunque aún más altos debido a CBA, están cada vez más limitados por las limitaciones de nutrientes del suelo. Este estudio sugiere que los rendimientos comestibles y de los cultivos de residuos pueden aumentar a lo largo de nuestros añosprobando su suelo, aplicando fertilizantes orgánicos apropiados y usando CBA. Este enfoque permite distribuir los costos sobre al menos cuatro años y hace que el proceso de mejora de la fertilidad del suelo y los rendimientos de los cultivos sea más asequible y esté disponible para los agricultores de todo el mundo.

Después de décadas de reducir el hambre mundial, desde 2015 el número de personas hambrientas ha aumentado. En el África subsahariana en particular,el porcentaje de personas desnutridas pasóde 20,9 en 2015 a 22,8 en 2018 (FAO 2019). Además, África ha hecho el menor progreso en la reducción del retraso en el crecimiento con el 40% del retraso en el crecimiento mundial en 2018 (FAO 2019). Para agravar este problema existente, se espera que la población del África subsahariana (SSA) se duplique (ONU 2010) y aumente las demandas calóricas per cápita.

CBA combinado con una prueba de suelo única y la aplicación de fertilizantes orgánicos apropiados ofrece una manera potencial para que las personas, familias y comunidades mejoren su seguridad alimentaria.

**Conclusión**

A sobre la aplicación en tiempo electrónico de las enmiendas orgánicas apropiadas utilizadas en el sistema CBA de rendimiento comestible y de residuos de cultivos sostenidos o mejorados durante cuatro años en cuatro granjas de Kenya. Junto con la respuesta positiva de la plantas,la calidad delsuelo y el ciclo de nutrientes se mantuvieron o mejoraron. CBA es una compilación ic sinérgicade ocho pozos-principles sostenibles documentados para ofrecer a los agricultores, eespecialmente pequeñosaccionistas, una opción viable para abordar el aumento de la demanda de alimentos.

**Limitaciones**

Es cierto que los tamaños de las muestras eran más pequeños de lo ideal en este estudio inicial. Sin embargo, el grado en que los rendimientos comestibles y residuales y los niveles de parámetros del suelo se mantuvieron o aumentaron fueron más allá de nuestras expectativas. Este enfoque para aumentar la producción de alimentos y la soberanía alimentaria, al tiempo que reduce el uso de recursos, parece prometedor y debería probarse aún más en otros sitios bajo climas, cultivos y suelos varices.

**Contribuciones del autor**

JB diseñó la investigación; SN llevó a cabo lainvestigación; LT proporcionó el análisis estadístico de los datos; JB, SM y LT interpretaron el análisisestadístico; JB y SM interpretaron los resultados; JB y SM tenían la responsabilidad principal de escribir el documento, con contribuciones significativas a la sección resultados de LT; Todos los autores revisaron y aprobaron el manuscrito final.

**Reconocimiento**

Los autores están agradecidos a la Dra. Laura Lengnick por sus ideas, comentarios y contribuciones. Los autores aprecian trabajar con los agricultores de G-BIACK y esperan que sus suelos sigan prosperando. Los autores agradecen a Carol Moore y Meghan Beeby la lectura de pruebas para gramática, ortografía y clarity de ideas. Los autores también quieren agradecer al Dr. John Doran por su apoyo.

**Financiación**

La financiación para llevar a cabo la investigación fue proporcionada por REAP – Renewing Earth and Its People Foundation. La Fundación REAP ya no está activa. La financiación para la publicación de código abierto fue proporcionada por Ecology Action.

**Conflicto de intereses**

Los autores no tienen obligaciones financieras o de financiación que puedan afectar a su objetividad. JB, SM y SN han trabajado estrechamente con aquellos que investigan y enseñan CBA. Sienten que esto proporciona una comprensión sólida de los principios de CBA que se están probando, pero, en todos los casos, buscan que la investigación, los datos y el análisis estadístico hablen por sí mismos sin sesgo. JB es el propietario de Grow Your Soil.

**Material suplementario**

Los materiales suplementarios se pueden recuperar a https://github.com/ltaylor18/SampleAppendix

**Referencias**

Akinnifesi, F. K., Ajay, O.C., Sileshi, G., Chirwa, P.W. y Chianu, J. (2010) Fertilizantes para

seguridad alimentaria sostenible en los sistemas de producción a base de maíz de África Oriental y Meridional. Una revisión. Agronomy para eldev elopment sostenible 30: 615-629. https://doi.org/10.1051/agro/2009058

Akkari, C., y Daouda, O. (2015) ¿Pueden los fertilizantes orgánicos establecer el ritmo de una revolución agrícola cultivable más verde en África? Síntesis de análisis y un way adelante. Política de uso de la tierra 47:179-187. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.01.033>

Badgley, C., Perfecto, I. (2007) ¿Puede la agricultura orgánica alimentar al mundo? Renewable Agricultura y Sistemas Alimentarios 22(2):80-86. <https://doi.org/10.1017/S1742170507001986>

Baig, M.B., Zia, M. S, Tahir, M.B. (1999) Cuestiones ambientales del suelo y su impacto en la productividad agrícola de las zonas potenciales del Pakistán. Visión científica 4(3):56-60.

Baig, M.B., Shahid, S.A., Straquadine, G.s. (2013) Marcando la agricultura con mosca de la lluvia sostenible a través detec hnologies respetuosos con el medio ambiente en Pakistán: Una revisión. Investigación Internacional sobre conservación del suelo y el agua 1(2): 36-52. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30038-1](https://doi.org/10.1016/S2095-6339%2815%2930038-1)

Brady, N.C., Weil, R. R., (2017) The Nature and Properties of Soils 15th ed. Pearson Education Limited, Essex England ISBN-13: 978-0133254488.

Brouder, S., Gómez-Macpherson, H. (2014) El impacto de la agricultura de conservación en los rendimientos agrícolas de los pequeños agricultores: Una revisión de la evidencia. Agricultura, Ecosistemas y Medio Ambiente 187:11-32. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.010>

Banwart, S.A., Nikolaidis, N. P., Zhu, Y-G., Pavo Real, C. L., Sparks, D. L. (2019) Funciones del suelo: Conectarla zona crítica de laTierra. Anual Review de tierra y ciencias planetarias 47:333-359. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-020544>

Barrington, S., Choiniere, D., Trigui, M. y Knight, W. (2002) Efecto de la fuente de carbono en las pérdidas de nitrógeno compost y carbono. Tecnología Bioresource 83:189-194. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00229-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524%2801%2900229-2)

Bhagsari, A. S. y Ashley, D. A. (1990) Relación de fotosíntesis e índice de cosecha con el rendimiento de batata. Revista de la Sociedad Americana de Ciencias Hortícolas 115(2): 288-293. <https://doi.org/10.21273/JASHS.115.2.288>

Bloem, E., Haneklaus, S., Sparovek, G. y Schnug, E. (2001) Variabilidad espacial y temporal de la concentración de sulfato en los suelos. Comunicaciones en Ciencias del Suelo y Análisis de Plantas 32(9-10): 1391-1403. <https://doi.org/10.1081/CSS-100104201>

Bodirsky, B. L., Rolinski, S., Biewald, A., Weindl, I., Popp, A., et al (2015) Escenarios globales de demanda de alimentos para el siglo XXI. PloS uno, 10(11), e0139201. [https://doi.org/10.1371/journal.0139201.](https://doi.org/10.1371/journal.%20pone.0139201.)

Bomford, M. K. (2009) Los tomates aman la albahaca, ¿pero odian los brotes de Bruselas? Competencia y eficiencia en el uso de la tierra de mezclas de cultivos popularmente recomendadas y desalentados en biointensivos. Revista de Agricultura Sostenible 33: 396–417. <https://doi.org/10.1080/10440040902835001>

Declaración de Nyeleni (2007) Definición de la soberanía alimentaria <https://nyeleni.org/spip.php?article290> (consultado el 8/21/2018).

Eiland, F., Klamer, M., Lind, A.M., Leth, M., Baath, E. (2001) Influencia de la relación C/N inicial en la composición chemical y microbial durante el compostaje a largo plazo de paja. Ecología Microbiana 41: 272-289. [https://doi:.org/10.1007?s002480000071](http://FC9D2C5DACE2C77FE6D04D8DB203387397FBAB00/https%3A//doi%3A.org/10.1007%3Fs002480000071)

FAO (2012) Vías de sostenibilidad: pequeños agricultores y agricultores familiares. [http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/sustainability\_pathways/docs/Factsheet\_SMALLHOLDERS.pdf.](http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/sustainability_pathways/docs/Factsheet_SMALLHOLDERS.pdf.%20) (consultado el 4/8/2019).

FAO, FIDA, UNICEF, PMA y OMS. (2019) El Estado de la Seguridad Alimentaria y la Nutrición en el Mundo 2019. Salvaguarda contra la desaceleración económica y las desaceleraciones. Roma, FAO. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO [https://www.wfp.org/publications/2019-state-food-security-and-nutrition-world-sofi-safeguarding-against-economic](https://www.wfp.org/publications/2019-state-food-security-and-nutrition-world-sofi-safeguarding-against-economic%20) (consultado 7/29/2019).

FAOSTAT: [http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC](http://www.fao.org/faostat/en/%23data/QC%20) (consultado el 2/6/19).

Folberg, C., Yang, H., Gaiser, T., Liu, J., Wang, X., Williams, J. y Schulin, R. (2014) Efectos de las prácticas de intensificación ecológica y convencional de la agricultura en los rendimientos del maíz en el África subsahariana bajo el potencial cambio climático. Cartas de Investigación Ambiental 9 044004 (12pg) <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044004>.

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., y Zaks. D. P.M. (2011) Soluciones para un planeta cultivado. Naturaleza 478: 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>

Gliessman, S. R. ed. (1990) Agroecología: Investigación de la Base Ecológica para la Agricultura Sostenible. Springer-Verlag, 380 pp. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3252-0\_1

Godfray, H.C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir. J. F., Petty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C. (2010) Seguridad Alimentaria: El desafío de alimentar a 9 mil millones de personas. Ciencia 327: 812-818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>

Hatfield, J. L., Morton, L.W., Principio de Marginalidad. En: Lal, R., Stewart, B. A. editores (2013) Principios de Gestión Sostenible del Suelo en Agroecosistemas, CRC Press, Boca Ratón, FL ISBN-13: 978-1-4665-1346-4.

Haug, R.T., (1993) El libro práctico de la ingeniería de compost. Lewis Publishers. Boca Raton Florida. ISBN 9780873713733.

HLPE (2017) Sistemas nutricionales y alimentarios. Un informe del Grupo de Expertos de Alto Nivel sobre Seguridad Alimentaria y Nutrición del Comité de Seguridad Alimentaria Mundial de Roma. <http://www.fao.org/3/a-i7846e.pdf> (consultado el 7/29/2019).

Jeavons, J. (2001) Mini-agricultura biointensiva sostenible. Revista de Agricultura Sostenible 19(2): 49-106. <https://doi.org/10.1300/J064v19n02_10>.

Jeavons, J. (2017) Cómo cultivar más verduras 9th ed. Prensa de velocidad de diez. EE.UU. 249 pp. ISBN: 978-0-399-57918-9.

Kersetz, M. y Mirleau, P. (2004) El papel de los microbios del suelo en la nutrición con azufre vegetal. Journal de Botánica Experimental 55(404):1939-1945, <https://doi.org/10.1093/jxb/erh176>

Kirchmann, H., Bergstrom, L. (2001) ¿Las prácticas de agricultura orgánica reducen la lixiviación de nitratos? Comunicaciones en Ciencias del Suelo y Análisis de Plantas 32: 585-599. <https://doi.org/10.1081/CSS-100104101>

Larsen, K.L., McCartney, D.M. (2000) Efecto de la relación C:N sobre la actividad microbiana y retención N: estudio a escala de banco utilizando biosólidos de pulpa y papel. Compost Science & Utilización 8(2):147-159. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2000.10701760>

Liu, J., Folberth, C., Yang, H., Rockström, J., Abbaspour, K., Zehnder, A. J.B. (2013) Una evaluación explícita global y espacial de los impactos del cambio climático en la producción de cultivos y el uso consumado del agua. PLoS Uno 8 e57750. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057750>

Lowder, S., Skoet, J., Raney, T. (2016) El número, tamaño y distribución de granjas, pequeñas granjas y familias de largonivel en todo elmundo. Desarrollo Mundial 87:16-29. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.10.041>

Magdof, F., Van Es, H. (2009) Construyendo suelo para mejores cultivos: gestión sostenible del suelo 3ª ed, Publicaciones de Agricultura Sostenible, Waldorf MD USA ISBN 978-1-888626-13-1.

Mahón, N., Crute, I., Di Bonito, M., Simmons, E. A., islam, M.M. (2018) Hacia un marco amplio y holístico de indicadores de Intensificación Sostenible. Política de uso de suelo 77:576-597. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.06.009>

Hombre, Y., Zhang, J., Xu, Y., Xiao, H., An, W., Xi, H., Xue, Z., Huang, H., Chen, X., Shen, A. (2015) Dinámica de la comunidad fúngica y factores de conducción durante el compostaje de residuos agrícolas. Environmental Science and Pollution Research 22:19879-19886. [https://doi.org/10.1007/s11356-015-5172-5.](https://doi.org/10.1007/s11356-015-5172-5)

Mengel K., Kirkby E.A., Kosegarten H., Appel T. (2001) Soil Copper. En: Mengel K., Kirkby E.A., Kosegarten H., Appel T. (eds) Principios de Nutrición Vegetal. Springer, Dordrecht.

Mohajan, H. K. (2014) Escenario de Alimentos y Nutrición de Kenia. American Journal of Food and Nutrition 2(2):28-38. https://doi.org/ 10.12691/ajfn-2-2-3

Muller, A., Schader,C., Scialabba,N., Bruggemann,J., Isensee,A., Erb,K-H., Smith, P., Kloche,P., Leiber,F., Stoize,M. Niggli,A. (2017) Estrategias para alimentar al mundo de manera más sostenible con la agricultura orgánica, Nature Communications (acceso abierto). [https://doi.org/ 10.1038/s41467-017-01410](https://doi.org/%20%2010.1038/s41467-017-01410)

Informe del Grupo Especial de Montpellier. (2013) Intensificación sostenible: Un nuevo paradigma para la agricultura africana. Agricultura para el impacto, 15 Princes Gardens, Campus de South Kensington, Imperial College, Londres, Reino Unido, SW7 1NA [www.ag4impact.org https://ag4impact.org/wp-content/uploads/2013/04/MP\_0176\_Report\_Redesign\_2016.pdf](http://www.ag4impact.org) (consultado el 7/29/2019).

Moore, S. R. (2010) Eficiencia energética en la producción de cebolla orgánica biointensiva a pequeña escala en Pensilvania, EE. UU. Renewable Agriculture and Food Systems 25(3):181-188. <https://doi.org/10.1017/S1742170510000098>

Murphy, D. E. (2017) Factores que conducen al éxito en la implementación de jardines biointensivos y en servir como agentes de extensión de jardinería biointensiva en Nicaragua: Utilizando un enfoque cualitativo. Departamento de tesis de Maestría de Salud Global, Milken Institute School of Public Health, The George Washington University, Washington, D.C. USA.

Omondi, E.C., Norton, J.B., Ashienje, D. S. (2014) Rendimiento de una variedad local de maíz polinizado abierto y una variedad híbrida común bajo prácticas intensivas de agricultura a pequeña escala. Revista Africana de Investigación Agrícola 9(11):950-955. https://doi.org/10.5897/AJAR2013.7359

Petersen, B., Snapp, S. (2015) ¿Qué es la intensificación sostenible? Opiniones deexpertos. Política de uso de la tierra 46:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.02.002>

Bonita, I., Toulmin, C., Williams, S., (2011) Intensificación sostenible en la agricultura africana. Revista Internacional de Sostenibilidad Agrícola 9:5-24. <https://doi.org/10.3763/ijas.2010.0583>

Rajbhsndari, B.P. (2011) Sistema de agricultura bio-intensiva: Validación de sus enfoques en el aumento de la producción de alimentos, mejora de la seguridad alimentaria y los medios de vida. Nepalese Journal of Agricultural Sciences 9: 112-123. ISSN 2091-042X.

Reganold, J. P., Wachter, J.M. (2016) Organic agricultura en el siglo XXI Plantas naturales 2: Unrticle número 15221 <https://doi.org/10.1038/NPlANTS.2015.221>

Rockström, J., (2003) Agua para alimentos y naturaleza en trópicos propensos a la sequía: vapor shift en la agricultura alimentada por la lluvia. Acciones trans filosóficas de la Royal Society B 358:1997-2009. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1400>

Rockström,J., Steffen, W., Noone,K., Persson, A., Chapin III, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T.M., Scheffer,M., Folke,C., Schellnhuber,H.J., Nykvist,B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin,S., Snyder. P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J. A. (2009) Límites Planetarios: Explorando el espacio operativo seguro para la humanidad. Ecología y Sociedad 14(2): 32. <https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232>

Rockström, J., Williams, J., Diario, G., Noble, A., Matthews, N., Gordon, L., Wetterstrand, H., DeClerck, F., Shah, M., Steduto, P., de Fraiture, C., Hatibu, N., Unver, O., Bird, J., Sibanda, L., Smith, J. (2015) Intensificación Sostenible de la agricultura para la prosperidad humana y la sostenibilidad global. Ambio: [https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-016-0793-6](https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-016-0793-6%20) (consultado el 2/27/2019) <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0793-6>

Roxburgy, C., Dorr, N., Leke, A., Tazi-Riffi, A., van Wamelen, A., Lund, S., Chironga, M., Alatovik, T., Atkins, C., Terfous, N. y Zeino-Mhmaiat, T. (2011) Leones en movimiento: el progreso y potencial de las economías africanas. Instituto Global McKinsey. <https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Featured%20Insights/Middle%20East%20and%20Africa/Lions%20on%20the%20move/MGI_Lions_on_the_move_african_economies_full_report.ashx> (recuperado 2/11/2020)

Sans, P., Combris, P. (2015) Patrones mundiales de consumo de carne: Una visión general de los últimos cincuenta años (1961-2011) Ciencia de la Carne 109:106-111. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.05.012>

Schimel, J., Schaeffer, S. M. (2012) Control microbiano sobre el ciclo del carbono en aceite s. Fronteras en microbiología 3: Artículo 348. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00348>

Silici, L. (2014) Agroecología: Qué es y qué tiene que ofrecer. Documento de edición Instituto Internacional para el Medio Ambiente y el Desarrollo (IIED) Londres ISBN: 978-1-78431-066-3.

Sindelar, A. J., Cordero, J. A., Sheaffer, C.C., Jung, H. G., y Rosen, C. J. (2012) Respuesta de grano de maíz, biomasa celulósica y rendimientos de etanol a la fertilización de nitrógeno. Revista Agronomía 104(2):363-370. https://doi.org/[10.2134/agronj2011.0279](https://doi.org/10.2134/agronj2011.0279)

Tillman, D., Balzer, C., Hill. J., Befort, B.L. (2011) Demanda mundial de alimentos y la intensificación sostenible de la agricultura. Actas de laN Academia Nacional de Ciencias 108:20260-20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108> .

Tiquia, S.M., Richard, T.L., Honeyman, M.S. (2002) Pérdida de carbono, nitrógeno y masa durante el compostaje. Nutrient Ciclismo en Agroecosistemas 62:15-24. [https://doi.org/10.1023/A:1015137922816](https://doi.org/10.1023/A%3A1015137922816)

Naciones Unidas, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. (2010) División de población, sección de estimaciones de población y proyecciones. [www.esa.un.org/wpp/panel\_population](http://www.esa.un.org/wpp/panel_population) (consultado el 8/15/2018).

Ayuda de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) (2012) Investing en Agricultura Sostenible. [www.usaid.gov/what-we-do/agriculture-and-food-security/investing-sustainable-agriculture](http://05772FEEC0EB8485EE48F66B3CB92455C4A0D233/file%3A///C%3A%5CUsers%5Cjsb76%5CDownloads%5Cwww.usaid.gov%5Cwhat-we-do%5Cagriculture-and-food-security%5Cinvesting-sustainable-agriculture) (consultado el 8/15/2018).

Wallace, J. S., (2000) Aumento de la eficiencia del uso del agua para satisfacer la futura producción de alimentos, agricultura, sistemas electrónicos y medio ambiente 82:105-119. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00220-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809%2800%2900220-6)

Weil, R. R., Brady, N.C. (2017) La naturaleza y las propiedades del suelo, 15 ed. Pearson Education Limited, Inglaterra ISBN-13: 978-01333254488.

WSU (2019) Compost fundamentos-recuperación de nitrógeno y otros nutrientes [http://whatcom.wsu.edu/ag/compost/fundamentals/consideration\_reclamation.htm](http://whatcom.wsu.edu/ag/compost/fundamentals/consideration_reclamation.htm%20) (recuperado 4/9/2019).

Zhang, W., Yu, C., Wang, X., Hai, L. (2020) La mayor abundancia de bacterias transformadoras de nitrógeno por una mayor relación C/N reduce las pérdidas totales de N y C en estiércol de pollo y mezcla de estufas de maíz. Tecnología Bioresource 297:122410. <https://doi.org/10.1016/j.biotech.2019.122410>