



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Ciencias Experimentales

Trabajo Fin de Grado

**Efectos de la aplicación
de diferentes enmiendas
orgánicas sobre el
desarrollo del Girasol
(*Helianthus annuus*) y
del Guisante (*Pisum
sativum*)**

Alumno: Milagros Torrús Castillo

Junio, 2018



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Universidad de Jaén

Facultad de Ciencias Experimentales

Grado en Ciencias Ambientales

Trabajo Fin de Grado:

**Efectos de la aplicación de
diferentes enmiendas
orgánicas sobre el desarrollo
del Girasol (*Helianthus annuus*)
y del Guisante (*Pisum sativum*)**

Milagros Torrús Castillo

Jaén, junio 2018



ÍNDICE



1. RESUMEN,	4
2. INTRODUCCIÓN,	5
2.1. Antecedentes,	5
2.1.1. <i>Burundi y escasez de nutrientes disponible,</i>	<i>5</i>
2.1.2. <i>Razones por las que se elabora dicho TFG,</i>	<i>6</i>
2.2. Burundi; país con una agricultura de subsistencia,	6
2.2.1. <i>Población y agricultura,</i>	<i>7</i>
2.2.2. <i>Pobreza en Burundi,</i>	<i>10</i>
2.2.3. <i>Clima,</i>	<i>11</i>
2.3. Suelos,	11
2.4. Enmiendas orgánicas potenciales para reemplazar los nutrientes retirados con la cosecha,	13
3. OBJETIVOS,	16
4. MATERIAL Y MÉTODOS,	16
4.1. Diseño experimental,	16
4.1.1. <i>Fuentes de variación,</i>	<i>16</i>
4.1.2. <i>Nivel de replicación y unidades experimentales,</i>	<i>17</i>
4.2. Procedimiento,	18
4.2.1. <i>Preparación de las semillas,</i>	<i>18</i>
4.2.2. <i>Cálculo de la cantidad de enmienda orgánica y de solución nutritiva requerida,</i>	<i>19</i>
4.2.3. <i>Montaje experimental,</i>	<i>22</i>
4.2.4. <i>Condiciones de incubación,</i>	<i>25</i>
4.3. Medida de biomasa cosechada,	25
4.3.1. <i>Contenidos en carbono y nitrógeno en la biomasa cosechada,</i>	<i>26</i>
4.3.2. <i>Nitrógeno potencialmente mineralizable,</i>	<i>27</i>
4.3.3. <i>Test de fitotoxicidad,</i>	<i>27</i>
4.3.4. <i>Análisis estadístico,</i>	<i>28</i>



5. RESULTADOS	29
5.1. Efecto de las distintas enmiendas orgánicas en el porcentaje de germinación del girasol y guisante	29
5.2. Efectos de las distintas enmiendas orgánicas en la producción de la biomasa total, biomasa aérea y la relación BA/BR del guisante	30
5.3. Efectos de las distintas enmiendas orgánicas en la producción de la biomasa total, biomasa aérea y la relación BA/BR del girasol	31
5.4. Nitrógeno potencialmente mineralizable	32
5.5. Test de fitotoxicidad	32
5.6. Contenidos en carbono y nitrógeno en la biomasa cosechada	33
5.6.1. <i>Contenidos en carbono y nitrógeno en la biomasa cosechada del guisante</i>	33
5.6.2. <i>Contenidos en carbono y nitrógeno en la biomasa cosechada del girasol</i>	36
6. DISCUSIÓN	39
7. CONCLUSIONES	43
8. BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA	44





1. RESUMEN

Hoy en día la agricultura de conservación se considera como una posible solución que integra la protección del medio ambiente y la producción sostenible de productos de calidad en países africanos como Burundi, donde las condiciones sociales, económicas, tecnológicas y ambientales son desfavorables. En este tipo de agricultura se potencia el reciclaje y la reutilización de fuentes de materia orgánica y nutrientes locales y asequibles. En el presente trabajo se evalúa el efecto de enmiendas orgánicas (Bokashi, biochar y compost) asequibles en Ngozi (Burundi) sobre el desarrollo de plantas tipo de girasol y guisante. Todas las enmiendas orgánicas incrementaron la biomasa, el carbono y el nitrógeno, cosechados en el girasol, con respecto a plantas control sin enmiendas. Sin embargo, sólo las plantas de guisante incubadas con bokashi mostraron una producción significativamente distinta al control. A partir de los resultados de este estudio se concluye que el bokashi fue la enmienda orgánica más adecuada para promover el crecimiento de plantas en sistemas agrícolas con suelos de baja fertilidad.

Palabras clave: Burundi / Agricultura de conservación / Enmiendas orgánicas / Bokashi / Biochar / Compost/ *Helianthus annuus* / *Pisum sativum*

ABSTRACT

Currently, agriculture of conservation is considered as a potential solution in African countries like Burundi, where social, economic, technical and environmental conditions are unfavorable. Under this agriculture type, the environmental protection and the sustainable production of quality food are integrated. This type of agriculture promotes the recycling and reutilization of locally available sources of organic matter and nutrients. In this study, the effects of different organic amendments (Bokashi, biochar and compost) availables in Ngozi (Burundi) on the production of sunflower and pea, as plant models, have been evaluated in a lab incubation experiment. The



application of these organic sources increased the production and harvested carbon and nitrogen in sunflower plants respect to control plants without any amendment. However, only the production and harvested carbon and nitrogen of pea plants was increased with bokashi. Results of this study highlight that bokashi is an adequate source of organic matter and nutrients which might increase the production of crops in low fertile soils in areas with restricted access to fertilizers.

Keywords: Burundi / Conservation agriculture / Organic amendments / Bokashi / Biochar / Compost / *Helianthus annuus* / *Pisum sativum*

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Antecedentes

2.1.1. Burundi y escasez de nutrientes disponibles

La productividad agrícola de los principales cultivos (maíz, trigo, entre otros) de buena parte de los países de África se encuentra entre las menores del planeta. Las razones son de muy diversa índole e incluye aquellas sociales, políticas y ambientales. Entre las últimas destaca la imposibilidad de adquirir fertilizantes para reemplazar aquellos retirados con la cosecha. Por ejemplo, Sheldrick y Lingard (2004) encontraron que el balance anual de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) para el conjunto del continente africano era de $-3 \cdot 10^6$ toneladas N, $-0.6 \cdot 10^6$ toneladas de P y $-4 \cdot 10^6$ toneladas de K, lo que denota que sale con la cosecha mucha mayor cantidad de nutrientes de los que entran y, por lo tanto, existe una salida neta de nutrientes del suelo de África, lo que puede llegar a su agotamiento.

Burundi, dónde más del 90% de la población vive de la agricultura y la ganadería y considerado como segundo país más pobre ¹del mundo, no es ajena a

¹ Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 7 de cada 10 hogares de Burundi tienen dificultades para consumir una comida al día, y en 2 de cada 10 se pasan días enteros sin comer.



este grave problema que limita, entre otros factores, su productividad agrícola. A modo de ejemplo, la cantidad de N en forma de fertilizante que entró en Burundi en 2015 fue la equivalente a tan solo 3.1 kg N ha^{-1} (FAOSTAT, 2015) la productividad promedio de trigo fue de 682 kg ha^{-1} , una de las menores de todo el mundo (FAOSTAT) y comparable con la descrita en zonas de Andalucía a mediados del siglo XVIII. Este hecho está agravado porque buena parte del terreno agrícola se considera como desfavorable debido a que los suelos corresponden a *Acrisoles*, *Ferralsoles* y *Nitisoles* (FAO, 2006; Jones *et al.*, 2013), que tienen un marcado carácter ácido que potencia la retención por precipitación de muchos nutrientes. Además, las precipitaciones anuales son relativamente elevadas, de ahí que se favorezca la pérdida de nutrientes por lixiviación. Además, la elevada erosionabilidad de estos suelos agrava la situación, que se une a la falta de conocimiento por parte de la población en el empleo de adecuadas prácticas agrícolas.

Es por todo ello que se requieren de estudios para evaluar la potencialidad para reciclar y reutilizar cualquier fuente de materia orgánica como fuente de nutrientes en Burundi, y llegar a un cierto equilibrio entre lo ambiental y lo social con el apoyo de técnicas agroambientales sostenibles.

2.1.2. Razones por las que se elabora dicho TFG

Durante el 2016, La Universidad de Jaén financió el proyecto: Mejora de la fertilidad y la calidad de los suelos a partir de recursos naturales locales (Zona de Ngozi, Burundi) en colaboración con ONGDs andaluzas. Este TFG se encuadra dentro de este proyecto y los resultados de este TFG servirán para completar y contrastar la información existente, con el fin de encontrar soluciones que puedan mejorar la situación de Burundi tanto en el aspecto social como ambiental. Para ello, en el presente trabajo se toma como pilar fundamental la agricultura de conservación, utilizando productos locales de la zona, asequibles para la población y de fácil manejo. De esta forma, se pretende mejorar las posibilidades nutricionales de la población.

2.2. Burundi; país con una agricultura de subsistencia

Burundi, cuya capital es Buyumbura, es un pequeño país de interior, que se encuentra en la parte del este-centro de África, contando con 17 provincias que en total cubre un área de 27834 kilómetros cuadrados. Burundi se encuentra limitada por Ruanda al norte, Tanzania al este y al sur, el lago Tanganica al suroeste y la República Democrática del Congo al oeste (Figura 1).

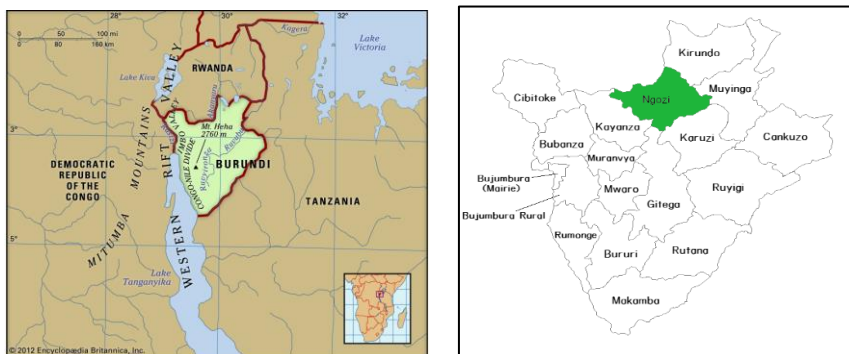


Figura 1. Localización de Burundi (Izquierda) y Ngozi (Derecha). Figuras tomadas de Enciclopedia Britannia y Burundi data portal.

2.2.1. Población y agricultura

Burundi contaba con una población total de 10.816.860 en 2014 (Figura 2), mientras que en Ngozi se estimaba que era de 819.079 personas en 2015 (Figura 3). Se estima que estas cifras aumentarán con el paso de los años, llegando a una población total de 13.126.273 personas en 2020 para el caso de Burundi (figura 2). (African Development Bank Group).

POBLACIÓN TOTAL

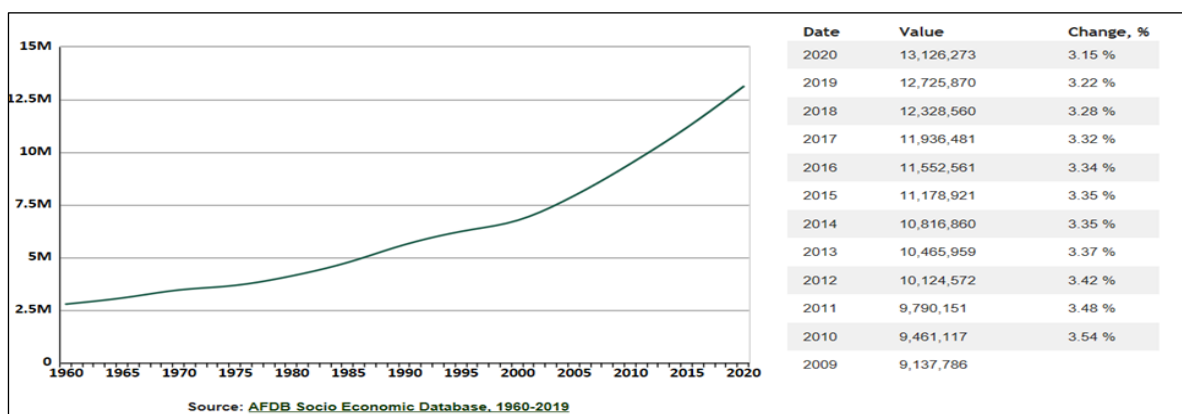


Figura 2. Población total de Burundi. Gráfica tomada de African Development Bank Group.

POBLACIÓN TOTAL EN NGOZI

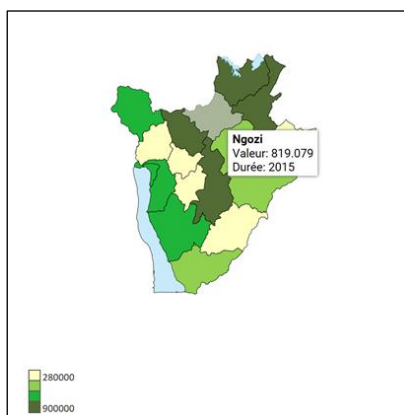


Figura 3. Población total de Ngozi. Ilustración tomada de Burundi Data Portal.

Esta explosión demográfica supone un aumento de los problemas ambientales, ya que habrá una mayor presión sobre suelos, los cuales ya se encuentran alterados de por sí debido al carácter ácido de los mismos, la degradación, erosión, entre otros. Además, la mitad de la superficie de Burundi es considerada arable (1.200.000 ha en 2014, African Development Bank Group) (Figura 6), predominando por lo tanto, el medio rural frente al urbano, (el 11, 8 % urbano, y 88,2 % rural (Lemarchand and Kahan, Enciclopedia Britannica) (Figura 4), y por consiguiente, la agricultura sea considerada el pilar económico del país (alrededor del 90 %, Central Intelligence Agency) y la actividad más llevada a cabo para que la población pueda subsistir (Figura 5), contribuyendo con el 44 % del PIB y el 95 % de los ingresos de exportación de Burundi (CSLPI). Entre las limitaciones que la agricultura presenta destacan: la fertilidad de los suelos, el escaso uso de insumos agrícolas, las fluctuaciones en la producción, la falta de innovación tecnológica, la presión demográfica, entre otros. Aun así, es posible encontrar oportunidades como la disponibilidad de mano de obra, posibilidad de practicar varias temporadas por año, variedad de ecosistemas que permiten la diversificación de cultivos, precipitaciones y una gran red de cursos de agua, etcétera. Es importante señalar la desigualdad que existe entre los distintos géneros en el sector agrícola, ya que las mujeres representan el 80 % de la fuerza de trabajo en dicho sector y el 84 % de la producción de alimentos (FAO).

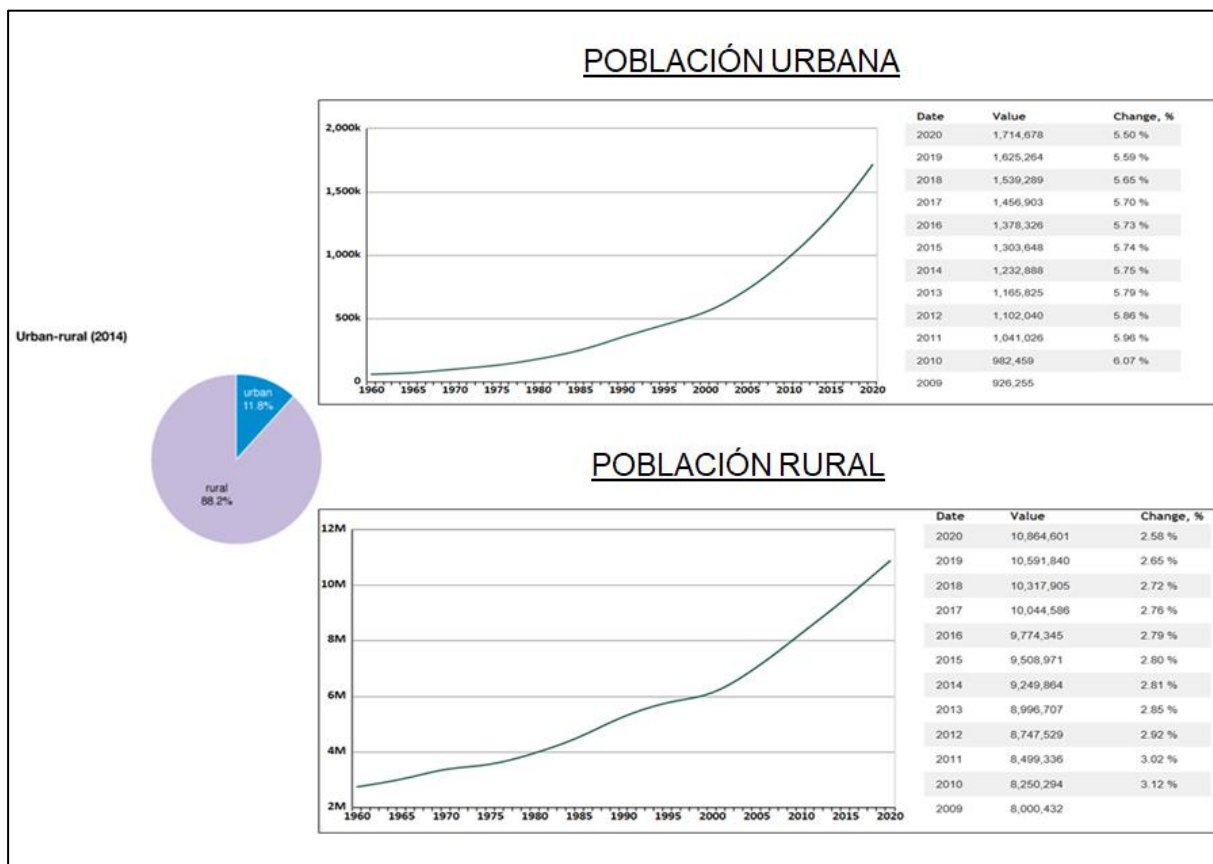


Figura 4. Población rural y urbana. Gráficos tomados de Enciclopedia Britannia y de African Development Bank Group.

POBLACIÓN AGRÍCOLA

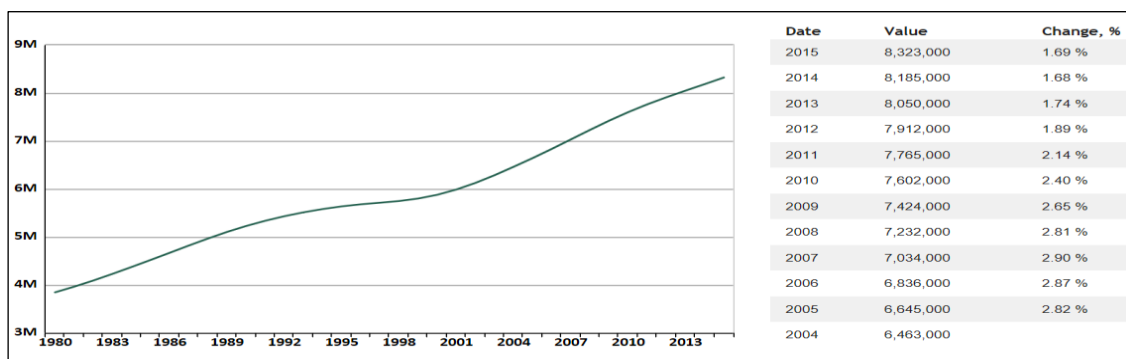


Figura 5. Población agrícola. Gráfica tomada de African Development Bank Group.



TIERRA ARABLE (Ha)

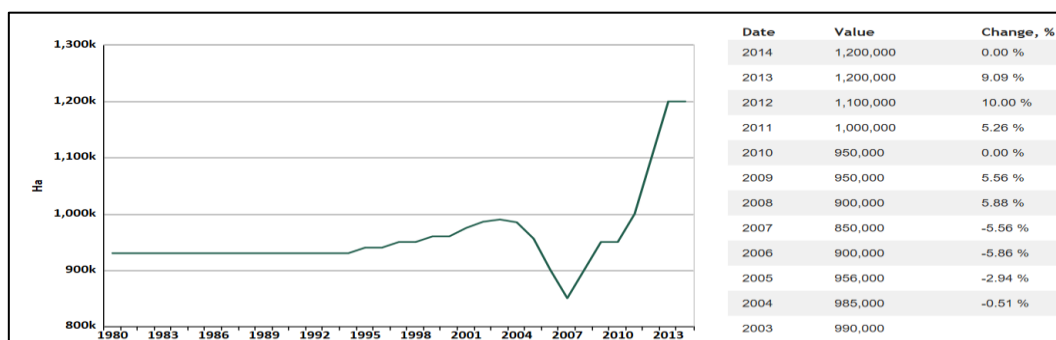


Figura 6. Tierra arable (Ha). Gráfica tomada de African Development Bank Group.

2.2.2. Pobreza en Burundi

Burundi es uno de los países más pobres del mundo, presentando el segundo PIB per cápita más bajo según el Banco Mundial después de la República Centroafricana, sin olvidar que la población sufre desnutrición crónica (aproximadamente en el 60 % de los niños) (Figura 7), escasez de alimentos, falta de agua potable e incluso muchos habitantes viven en la pobreza absoluta. De hecho, el informe 2011 Global Hunger Index producido por el Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IFPRI) clasifica a Burundi en el puesto dos con el índice de hambre más deteriorado. Además, según el informe de Questionnaire des Indicateurs de Base du Bien-être (QUIBB) en 2006 estima que solo el 37 % de los hogares tenían acceso al mínimo de calorías que se requieren (2100 Kcal por persona) frente al 30 % en 2011.

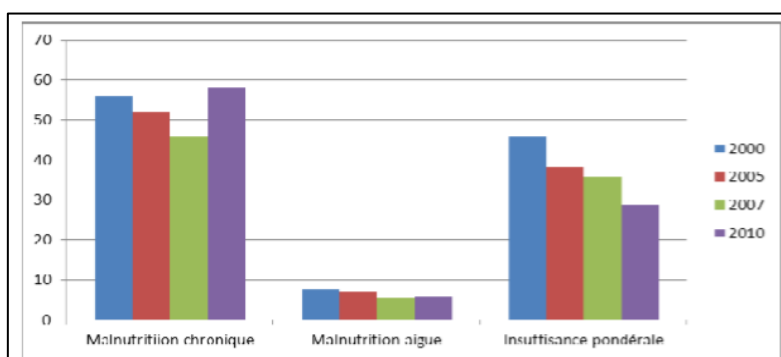


Figura 7. Evolución de distintos tipos de enfermedades en diferentes años. Gráfico tomado de Le Gouvernement de la République du Burundi Et L'Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO).



2.2.3. Clima

El clima predominante en Burundi es el tropical, las temperaturas medias suelen ser de unos 21°C durante el día, mientras que por la noche bajan a unos 15°C. Aunque, en las zonas más elevadas del país, ese promedio anual suele ser ligeramente más alto. Las precipitaciones están entorno a los 1500-1800 mm en las zonas altas, aunque en las zonas del lago Tanganica, son de 1000 mm. El país cuenta con dos estaciones principalmente, una seca que abarca de junio a septiembre y otra lluviosa de Febrero a Mayo (Figura 8). En la zona de Ngozi, el clima se caracteriza por ser cálido y templado, predominando las lluvias en verano. La temperatura media anual es de 18,5°C y de precipitaciones 1230 mm.

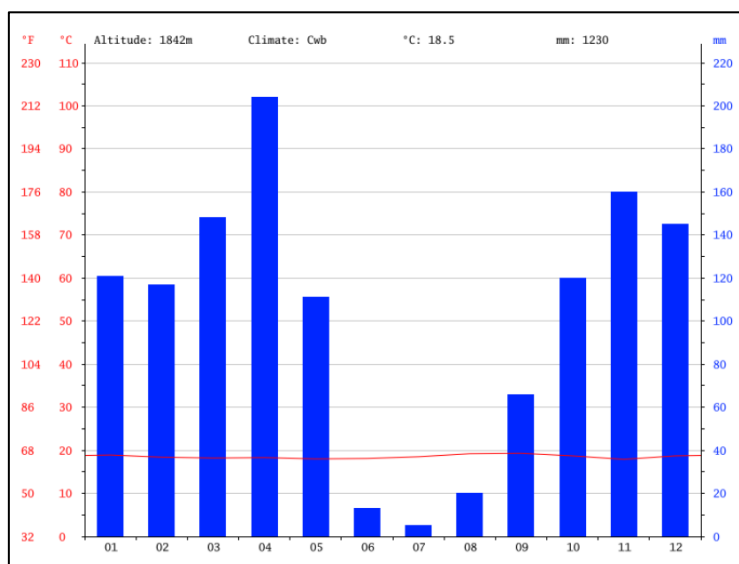


Figura 8. Climograma de la zona de Ngozi. Gráfico tomado de climate data org.

Como se puede observar en el climograma (Figura 8), el mes más seco es julio y con 5 mm de precipitación, y en abril la precipitación alcanza su pico, con un promedio de 204 mm.

2.3. Suelos

Los suelos que predominan en Burundi son los *Acrisoles*, *Ferralsoles* y *Nitisoles*, que se caracterizan por su carácter ácido. Las principales fuentes de



acidez de los suelos están relacionadas con su composición orgánica, mineralógica, condiciones climáticas, las prácticas que se realicen en el mismo, entre otras.

Mientras más rico sea el humus, uno de los principales componentes de la materia orgánica, en grupos carboxílicos, mayor será la acidez. Esto se debe, a que al poseer H^+ en su estructura, durante el proceso de descomposición, estos H^+ son liberados al suelo. A su vez, las arcillas del suelo tienen mayor reactividad superficial (cationes ácidos como el Al y el Fe que se liberan por hidrólisis y se hidrolizan), y confieren carácter ácido al suelo. Por otro lado, las intensas precipitaciones en materiales con elevada percolación provocan el lavado constante de carbonatos y bases de cambio (Ca, Mg, K), y por tanto esta pérdida de bases promueve la acidificación del suelo. La erosión produce efectos similares sobre la acidificación.

Por lo tanto, la disponibilidad de nutrientes en este tipo de suelos, se ve muy condicionado por el pH del suelo, siendo predominante elementos que resultan tóxicos para los cultivos, como son el aluminio, manganeso, hierro... Además, al existir deficiencias de nutrientes como son el calcio, potasio, nitrógeno, entre otros, el crecimiento de las plantas se va a ver afectado.

Existen otras problemáticas además de la acidez de dichos suelos, algunas de estas son la gran erosión existente debido al fuerte pastoreo que tiene lugar, la expansión de la agricultura hacia tierras marginales, inundaciones, deslizamiento de tierras, deforestación, pérdida de biodiversidad, y más.

La tipología de los suelos de la zona son los siguientes (Jones *et al.*, 2013):

- *Acrisoles*: suelos con fuerte carácter ácido, y baja saturación en bases debido a la fuerte alteración. Se desarrollan sobre productos de alteración de rocas ácidas. Predominan los bosques claros, y no son muy productivos (pobreza de nutrientes, toxicidad por aluminio, susceptibles a la erosión).
- *Ferrasoles*: suelos con elevado contenido de hierro y aluminio, de ahí su color rojizo y amarillo. Se desarrollan sobre productos de alteración de rocas básicas. Presentan buenas condiciones físicas para el desarrollo de las



plantas pero no químicas, se caracterizan por su baja fertilidad natural (limitada reserva de nutrientes) y tendencia a la fijación de fosfatos.

- *Nitisoles*: suelos que se desarrollan sobre productos de alteración de rocas intermedias o básicas, con textura fina. Son ricos en hierros y con poca presencia de arcillas. En ellos predomina el bosque húmedo tropical o vegetación de sabana. Se tratan de suelos fértiles, pese al bajo contenido de fósforo asimilable y su baja saturación en bases. Son profundos, estables y con propiedades físicas favorables.

2.4. Enmiendas orgánicas potenciales para reemplazar los nutrientes retirados con la cosecha

La situación en la que se encuentra los suelos africanos supone una amenaza para la agricultura, y por consiguiente un agravamiento de la pobreza, así como de la sostenibilidad ambiental. Tres cuartas partes de los suelos aptos para la agricultura en África se han degradado significativamente (Más del 80 % de los suelos en África tienen limitaciones químicas o físicas que limitan la producción de cultivos, Jones, 2006). Por lo tanto, para conseguir la seguridad alimentaria, es necesario que en África se lleve a cabo una agricultura de conservación utilizando prácticas sostenibles, y así poder aumentar la productividad y sostenibilidad de la agricultura. Un claro ejemplo de prácticas sostenibles, es el empleo de enmiendas orgánicas (residuos de origen animal y vegetal que adicionados a los suelos mejoran sus características químicas, físicas y biológicas), muchas de ellas desconocidas por la población, como es el caso de las que se estudian en este TFG, y que supondrían una mejora tanto en el aspecto social como ambiental, además de ser asequibles para la población. Pese al desconocimiento, el consumo de fertilizantes en África se ha ido aumentando con el paso de los años, tal y como se muestra en el gráfico siguiente (Figura 9), siendo en 2013, 8,841 la cantidad consumida (African Development Bank Group).

CONSUMO DE FERTILIZANTES

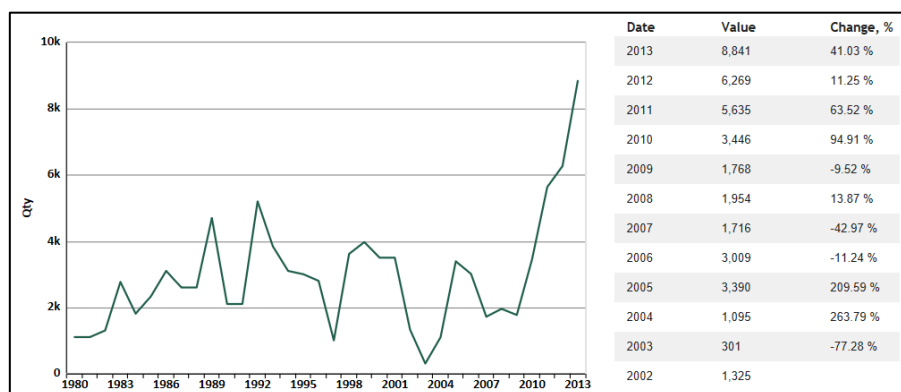


Figura 9. Consumo de fertilizantes en el país. Gráfica tomada de African Development Bank Group. Los valores en el eje Y hacen referencia a la cantidad (kg) por 1000.

Con este tipo de prácticas se mejorará la estructura del suelo, se minimizará la pérdida de nutrientes a través de la erosión, aumentará el crecimiento de hongos micorrízicos que favorecerá el crecimiento óptimo de las raíces de las plantas, mejorará la retención de humedad, aumentará la captura de carbono en el suelo y aumentará la resiliencia, entre otros. Además de su impacto en la sostenibilidad del suelo y el medio ambiente, hay indicios de que la aplicación de este tipo de agricultura de la conservación aumentó la productividad en 12,6 millones de parcelas, con un aumento promedio de cultivos del 79%. En el caso de África, estos resultados resultaron aún más satisfactorios, ya que mostraron un aumento del 116 % (Pretty, 2009).

Entre las posibles fuentes de nutrientes y materia orgánica potencialmente recicladas en Burundi, y que son los objetos de estudios de este TFG, se encuentran:

- **Biochar:** El biochar es un material rico en carbono obtenido a partir de un proceso de pirólisis o gasificación de biomasa (European Geosciences Union General Assembly, 2015 - Future challenges in biochar research). Esta enmienda tiene el potencial de ayudar a mitigar el cambio climático a través del secuestro de carbono (Lean, 2008). También, puede aumentar la fertilidad de suelos con pH bajo, aumentar la productividad agrícola, reducir la biodisponibilidad y la fitotoxicidad de los metales pesados (Woolf *et al.*, 2010).



También, la aplicación conjunta del biochar con el compost puede ser más efectiva para estabilizar y secuestrar carbono, en lugar de su aplicación de forma individual (Shih-Hao *et al.*, 2015). Se ha comprobado también, que el biochar puede perdurar ciento de años en el suelo más que otro tipo de materia orgánica (Ndameu, 2011).

En el caso de Burundi, el proceso para la realización de biochar consiste en pequeños hoyos en el suelo, con una cierta profundidad, en los cuales se inicia un fuego con ayuda de madera seca. Una vez lleno el hoyo, se cubre con hojas y encima se coloca una capa de tierra de aproximadamente veinte centímetros de espesor, al igual que con las hojas. De esta forma se cubre por completo el hoyo, y se deja durante un par de días hasta que se abra.

- Compost: el compostaje se basa en la acción de diversos microorganismos aerobios (Haugh, 1993), que actúa de manera sucesiva, sobre la materia orgánica original, en función de la influencia de determinados factores, produciendo elevadas temperaturas, reduciendo el volumen y el peso de los residuos y provocando su humificación y oscurecimiento (Nakasaki, 2005). Durante este proceso se han de controlar los distintos factores que aseguren una correcta proliferación microbiana, y por consiguiente, una adecuada mineralización de la materia orgánica (Cronje *et al.*, 2003). Entre los beneficios que supone el empleo del compost se encuentran: la disminución de la compactación del suelo, mejorar la estabilidad de los agregados, aumentar la capacidad de almacenamiento de agua utilizable por las plantas, así como mejorar la capacidad y velocidad de infiltración del agua en el suelo.

En el caso de Burundi el compost se basa en estiércol de vaca y paja, y no se controlan las variables necesarias para garantizar la total terminación del proceso, ya que se deja el material en un montón abandonado, y este va descomponiéndose.

- Bokashi: es un abono orgánico, rico en nutrientes, necesario para el desarrollo de los cultivos; que se obtiene a partir de la fermentación de materiales secos convenientemente mezclados. Entre los beneficios del bokashi, se pueden citar la mejora de las condiciones físicas así como



químicas, la aportación de macronutrientes al suelo, mejorar el desarrollo de los microorganismos, mayor resistencia a enfermedades y plagas, entre otros (FAO and AECID, 2011).

Entre los ingredientes básicos para la elaboración del bokashi se encuentran tierra tamizada del propio terreno, estiércol de vaca, cascarilla de arroz, malaza, pescado seco, semolina, etcétera. En primer lugar, todos los materiales se dispondrán en un montón formando capas de forma aleatoria para que se consiga una mezcla homogénea de los mismos. Por otro lado, en un cubo se mezcla la malaza con agua junto con la semolina, y posteriormente se mezcla los materiales con la mezcla líquida hasta que se consigue una textura idónea.

3. OBJETIVO

El objetivo del presente TFG es *evaluar los efectos de distintas enmiendas orgánicas procedentes de Burundi (Biochar, Bokashi, y Compost) en el desarrollo de plantas prototipo de girasol (*Helianthus annuus*) y guisante (*Pisum sativum*)*.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Diseño experimental

4.1.1 Fuentes de variación

a) Enmiendas orgánicas. Se emplearon tres tipos de enmiendas orgánicas procedentes del procesado de recursos naturales de Ngozi (Burundi); compost, biochar y bokashi. A estos tres niveles, se añadieron otros dos niveles que consistieron en el control (sin enmiendas de ningún tipo) y en una solución nutritiva. La cantidad de enmiendas orgánicas y de solución nutritiva se ajustaron para proporcionar 100 mg N. El contenido en nitrógeno, carbono (C) y la relación C/N de



las enmiendas ensayadas se muestran en la tabla 1. La descripción de estas enmiendas se detalla en el apartado 2.4.

b) Especies con fisiología contrastada. Los 5 niveles de la fuente de variación *enmiendas orgánicas*, se ensayaron en dos especies: girasol (*Helianthus annuus*) y el guisante (*Pisum sativum* L) cuyas semillas se obtuvieron en una tienda especializada en la venta de semillas. El motivo por el cual fueron seleccionadas estas especies fue que presentan un rápido desarrollo y porque son especies con metabolismo fisiológico contrastado. Los ensayos se realizaron en dos especies para evaluar el grado de robustez de la respuesta del crecimiento ante las distintas enmiendas. Mientras que el girasol es una compuesta, el guisante es una leguminosa. El girasol pertenece a la familia de las compuestas o asteráceas con una amplia capacidad de adaptación a condiciones pedo-climáticas aunque muestra preferencia por zonas con temperaturas medias anuales relativamente elevadas. Es una planta herbácea anual, heliófila, y con indiferencia edáfica, aunque es cierto, que se desarrolla de manera más óptima bajo suelos ricos en materia orgánica (MO), así como en aquellos donde existe un alto contenido de arcillas y arenas. El guisante pertenece a la familia de las leguminosas, pero también se trata de una planta herbácea, la cual necesita estar expuesta al sol, y se desarrolla bien bajo un clima fresco, es decir frío y húmedo. A diferencia del girasol, el guisante no es tan exigente en el contenido de materia orgánica que se encuentre en el suelo, pero requiere que el suelo esté suelto y ligero, y que esté bien drenado.

4.1.2. Nivel de replicación y unidades experimentales

Para cada combinación de niveles de cada fuente de variación se utilizaron 3 réplicas. Por tanto, el número de unidades experimentales fue de 5 niveles de la fuente de variación *enmiendas orgánicas* x 2 niveles fuente de variación *especies con fisiología contrastada* x 3 réplicas = 30 unidades experimentales; 15 para el girasol y otras 15 para el guisante. Cada unidad experimental consistió en una maceta que contenía vermiculita, semillas de girasol o guisante, y bokashi /compost/ biochar o solución nutritiva o nada (control).

4.2. Procedimiento

4.2.1. Preparación de las semillas

Antes de su inserción en macetas, las semillas fueron pretratadas. El pretratamiento es esencial ya que la humectación de las semillas en agua favorece la germinación de éstas.

Las semillas de girasol se colocaron en sucesivas capas sobre el papel del filtro, el cual se humedeció con agua destilada y se introdujo posteriormente en un sobre de papel de aluminio (Figura 10, girasol). Estos sobres se mantuvieron en la estufa durante tres días, y a una temperatura de unos 25°C. En el caso de las semillas de guisante, estas se introdujeron en agua unos quince minutos antes de su plantación (figura 10, guisante).

Girasol



Guisante



Figura 10. Fotografías mostrando el procedimiento seguido para la preparación de semillas. Fuente propia.



4.2.2. Cálculo de la cantidad (peso) de enmiendas orgánicas y de solución nutritiva requerida

En primer lugar, se consideró como criterio para determinar la cantidad de enmiendas a añadir por maceta la cantidad de nitrógeno (N). El hecho de considerar el nitrógeno, con respecto a otro, se debe a que es uno de los principales elementos que limitan la producción ya que forma parte de las proteínas, las amidas, la clorofila, hormonas, entre otros. La deficiencia de este elemento supone una disminución en el crecimiento de la planta, así como en el fruto, incluso llegando a producir clorosis en las hojas, las cuales pueden llegar a caerse si la carencia es severa.

Todas las unidades experimentales deben recibir la misma cantidad de N para que el N no sea una fuente de variación. En este estudio todas las unidades experimentales recibieron 100 mg de N, excepto aquellas con control. Teniendo en cuenta el porcentaje de N de las enmiendas (tabla 1), se calculó la cantidad de enmienda que debía recibir cada maceta para aportar 100 mg N (tabla 1). A partir de estimaciones preliminares se asumió que 100 mg N era una cantidad suficiente para que el adecuado desarrollo de las especies ensayadas no estuviera limitado por N.

Enmienda	Porcentaje de N (%)	Porcentaje de C (%)	C/N	Cantidad de enmienda añadida por maceta (gr)
Bokashi	0.59a ± 0.032	11.6a ± 0.24	20a ± 0.66	16.83
Compost	1.92b ± 0.048	25.1b ± 0.32	13b ± 0.45	5.19
Biochar	0.82c ± 0.007	66.4c ± 0.29	81c ± 1.06	12.22

Tabla 1. Porcentaje de N, C y relación C/N de las distintas enmiendas orgánicas. Los valores son la media ± desviación típica de tres réplicas. Diferentes letras en una misma columna denotan diferencias significativas ($P < 0.05$).

El compost se trata de la enmienda orgánica, con el mayor porcentaje de nitrógeno orgánico, siguiéndole el biochar y por último el bokashi. Sin embargo, para el porcentaje de carbono, el biochar es el que presenta el mayor valor, lo que es

razonable puesto que el biochar se trata de carbón vegetal. El compost fue el tipo de materia orgánica con mayor contenido en nitrógeno. La relación C/N del compost fue la menor y está dentro de los valores catalogados como ideales. En el caso del biochar la relación C/N fue la mayor lo que denota, en principio su falta de idoneidad.

Estas cantidades fueron pesadas con una balanza de precisión y se introdujeron en tubos falcon con la nomenclatura correspondiente (Figura 11). Las enmiendas se homogenizaron antes de su aplicación en las macetas para garantizar la representatividad de las mismas.

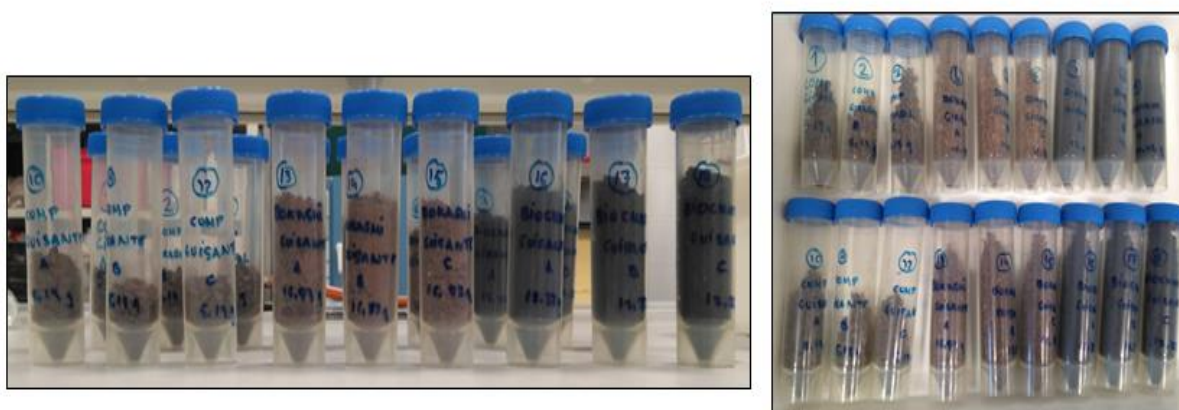


Figura 11. Tubos falcon con la nomenclatura correspondiente y cantidad exacta de enmiendas orgánicas. Fuente propia.

La solución nutritiva que se utilizó fue la de Hoagland al 50%, con la salvedad de que se añadieron la cantidad de N necesaria para añadir 100 mg de nitrógeno en cada maceta. Esta solución aporta a la planta todo lo que necesita, sin que el crecimiento de la misma sea limitado por escasez de macro y micro-nutrientes. La inclusión de unidades experimentales con esta solución nutritiva permite comparar el crecimiento obtenido por la enmiendas con otro tratamiento dirigido a obtener el máximo crecimiento posible en las condiciones de luz, fotoperiodo y humedad establecidas. La solución nutritiva contenía los compuestos que se reseñan en la tabla 2.



Macronutrientes	Cantidad del compuesto (g L ⁻¹)	Volumen de la solución (mL L ⁻¹)
NaH ₂ PO ₄ x 2 H ₂ O	0.156	1
MgSO ₄ x 7 H ₂ O	0.123	0.5
CaCl ₂ x 2 H ₂ O	0.294	2
Micronutrientes	µM	mL L ⁻¹
KCl	50 µM	1
H ₃ BO ₃	25 µM	
MnSO ₄ x H ₂ O	2 µM	
ZnSO ₄ x 7 H ₂ O	2 µM	
CuSO ₄ x 5 H ₂ O	0.5 µM	
MoO ₃ /H ₂ MoO ₄	0.5 µM	
Solución de hierro	3 µM	3 mL L ⁻¹

Tabla 2. Concentración final y volúmenes de las soluciones madre para macronutrientes y micronutrientes.

Una vez preparada la solución, se ajustó el pH a $6,5 \pm 0,1$ (Figura 12). Posteriormente, la solución se vertió en una garrafa preparada para no ser afectada por la radiación solar y no degradarse. Se fue añadiendo dicha solución nutritiva cada vez que se regaban las macetas (véase 4.2.4.) hasta que se añadieron los 100 mg N.

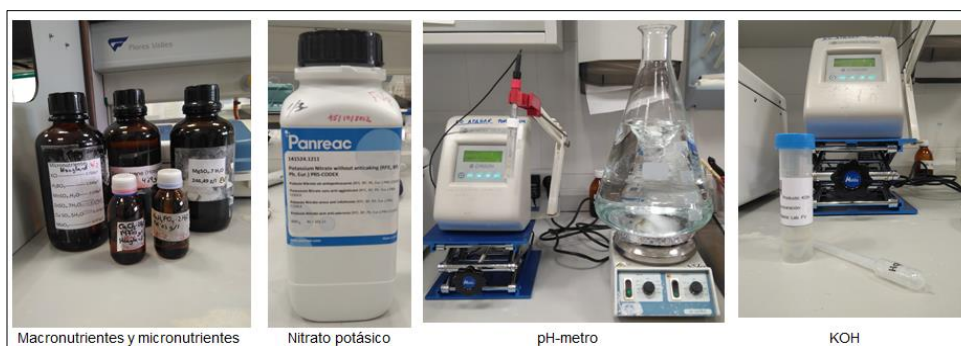


Figura 12. Algunos de los instrumentos y soluciones empleados en la elaboración de la solución nutritiva. Fuente propia.



4.2.3. Montaje experimental

Una vez que las semillas habían sido sometidas al pretratamiento, y se conocía la cantidad necesaria de enmienda orgánica, se procedió al montaje experimental que consistió en (figuras 13, 14, 15 y 16):

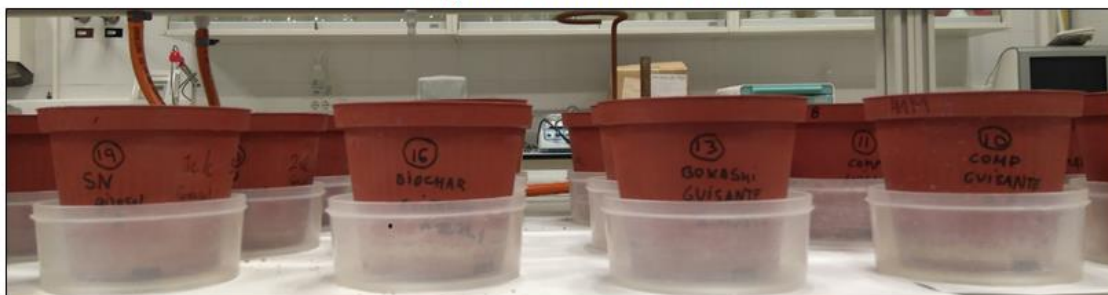
1.- Llenado de macetas con la vermiculita; sustrato inerte. En el fondo de cada una de las macetas se puso dos rejillas para evitar que la vermiculita (sustrato inerte con función de fijación) escapase de las mismas. Posteriormente, se pesaron con ayuda de una balanza granatario 40 gramos de vermiculita para cada una de las macetas.

2.- Aplicación de las fuentes de materia orgánica en las correspondientes macetas. Las cantidades calculadas de enmiendas orgánicas se mezclaron con la vermiculita para conseguir una distribución homogénea. En el caso del control no se añadió nada. Una vez mezclado, se añadió 100 ml de agua destilada lentamente a cada una de las macetas.

3.- Plantación de las semillas y la distribución de las macetas en la cámara de cultivo. Se añadieron 10 semillas por maceta, tanto para las de girasol como las de guisante. Para ello se utilizaron unas pinzas intentando que hubiese una distancia similar entre ellas. A continuación, se añadió una pequeña capa de vermiculita para que las semillas se quedaran cubiertas, y se humedeció un poco con agua destilada.



Pesar 40 gr de vermiculita en las 30 macetas



Rotulación de las macetas

Figura 13. Protocolo seguido para el montaje del ensayo (I). Fuente propia.



Adición de la fuente de materia orgánica (enmiendas orgánicas ya pesadas)



Mezcla de la fuente de materia orgánica con la vermiculita

Figura 14. Protocolo seguido para el montaje del ensayo (II). Fuente propia.

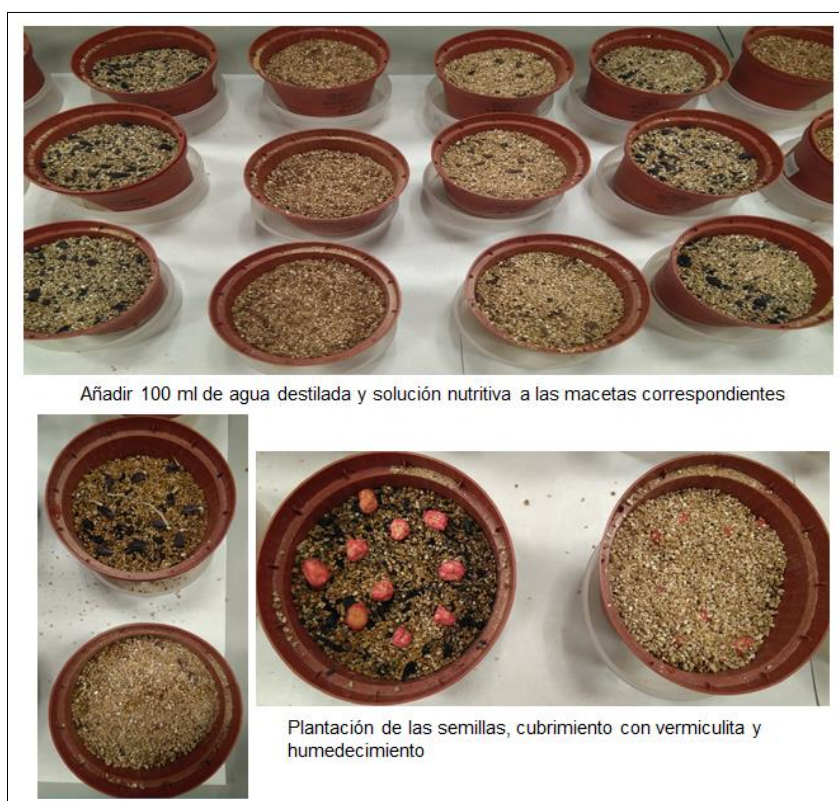


Figura 15. Protocolo seguido para el montaje del ensayo (III). Fuente propia.



Figura 16. Protocolo seguido para el montaje del ensayo (IV). Fuente propia.

4.2.4. Condiciones de incubación

Las macetas fueron introducidas en la cámara de cultivo hasta que las plantas alcanzasen un desarrollo suficiente (aproximadamente un mes) (Figura 17). Las condiciones de cultivo fueron:

- i) Fotoperiodo de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad.
- ii) Temperatura entorno a los 26 grados y un 52 % de humedad relativa.

Durante el periodo de incubación cada maceta recibió semanalmente 100 ml de agua destilada, excepto las macetas con solución nutritiva que recibieron 100 ml de solución nutritiva hasta añadir 100 mg N y después 100 ml de agua destilada.



Figura 17. Cámara de cultivo y distribución de las plantas en la cámara en distintas semanas. Fuente propia.

4.3. Medida de biomasa cosechada

Las plantas se retiraron de la cámara de cultivo una vez transcurrido el mes. Después, se realizó los pasos adecuados para poder determinar la biomasa de las mismas. Las plantas se sacaron de la maceta, se retiró aquellos granos de vermiculita que pudieran haber quedado adheridos al sistema radicular y se

dispusieron en un papel secante. Posteriormente, se secaron en estufa a 35 °C durante dos días. Transcurrido este tiempo, se separó la parte radicular de la área de todas las plantas de cada maceta, y se pesaron en una balanza de precisión (Figura 18).

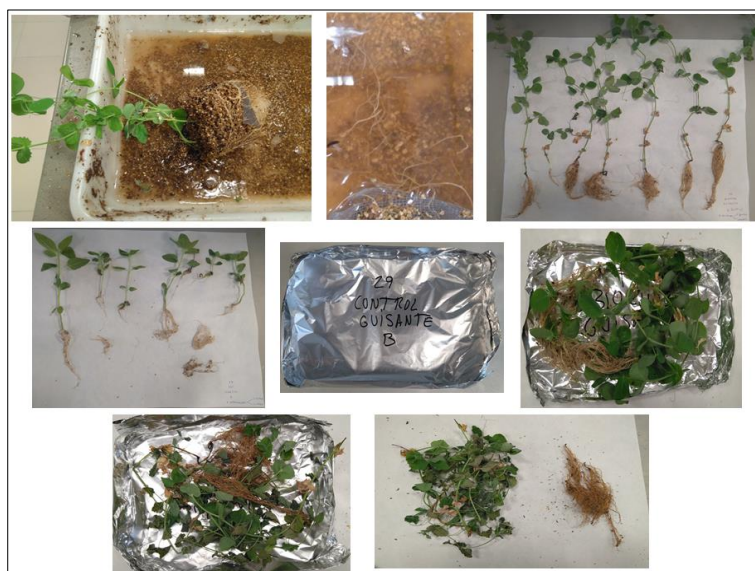


Figura 18. Pasos seguidos para la medida de la biomasa. Fuente propia.

4.3.1. Contenidos en carbono y nitrógeno en la biomasa cosechada

Una vez seca, la biomasa aérea y radicular de cada maceta se molió a través de un molino de aspas (< 1 mm) y una alícuota se guardó en tubos eppendorfs (Figura 19). El contenido en carbono y nitrógeno, tanto de la biomasa aérea como radicular se determinó a través de analizador elemental CHNS. La cantidad de C y N en la biomasa aérea, radicular y el total de la planta se estimó a partir de los porcentajes de C y N y la biomasa cosechada.



Figura 19. Molinillo para la tritución de las muestras vegetales, y tubos Eppendorf rotulados. Fuente propia.

4.3.2. Nitrógeno potencialmente mineralizable

Para conocer el potencial de suministro de N de cada una de las enmiendas orgánicas, se determinó el contenido en N potencialmente mineralizable siguiendo el método propuesto por Kandeler (1995). Brevemente, 2 g de enmiendas por triplicado se incubaron con 15 ml agua destilada a 40 °C durante una semana. Asimismo, otros 2 gr de enmienda con la misma cantidad de agua destilada se congelaron antes de la incubación. Transcurrido el periodo de incubación se añadió 15 ml de KCl 2 M tanto a los tubos incubados como a los congelados que previamente habían sido descongelados (Figura 20). Se determinó la concentración de amonio en los extractos. El contenido en N potencialmente mineralizable se estimó restando de la concentración de amonio en los tubos incubados aquella medida en los tubos congelados.

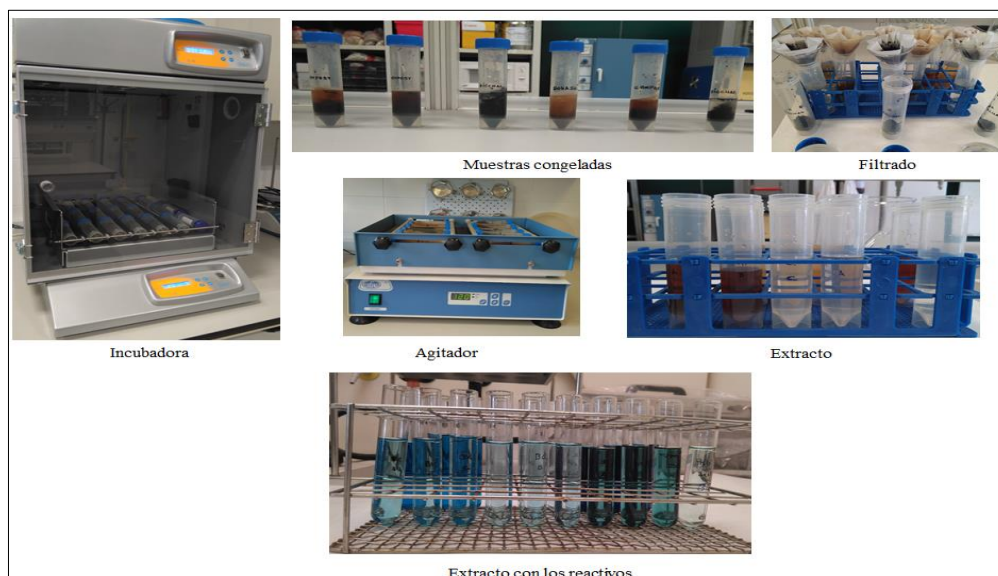


Figura 20. Algunos de los pasos seguidos para la determinación del N potencialmente mineralizable. Fuente propia.

4.3.3. Test de fitotoxicidad

Para evaluar la posible fitotoxicidad de las enmiendas orgánicas ensayadas sobre las plantas seleccionadas, se empleó el índice de germinación siguiendo la metodología propuesta por Zucconi *et al.*, (1981).



El procedimiento seguido para la realización del test de fitotoxicidad consistió en:

1. Humedecer el material (60 %) y reposo (30 minutos)
2. Añadir 13,5 ml de agua destilada por gramo de muestra seca
3. Agitar durante 30 minutos
4. Centrifugación (4000 rpm, 10 minutos)
5. Filtrar con papel de 0,45 μm mediante vacío
6. Colocar 10 semillas en placas de Petri con papel de filtro y añadir 1 ml de extracto acuoso (10 repeticiones)
7. Introducción placas de Petri envueltas en papel de aluminio en la estufa (2 días a 28°C)
8. Añadir 1 ml de la mezcla de etanol y agua (se puede obviar)
9. Cuantificación número de semillas germinadas y longitud de las raíces por placa
10. Aplicación de la fórmula: $\text{GI (\%)} = (\% \text{ G} \times \% \text{ L}) / 100$. Donde G, es el porcentaje de germinación de las semillas y L el porcentaje de elongación de las raíces.

Se compararon los valores que se obtuvieron del extracto acuoso de las enmiendas orgánicas con aquellos control con agua destilada. Valores superiores al 80% indican que el material orgánico no es fitotóxico y que además potencian el crecimiento de la planta utilizada en el ensayo.

4.3.4. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software Statgraphics Centurion XVI (Stat Point Technologies, Inc.) para Windows. Los datos se expresan como medias aritméticas y se acompañan de su desviación estándar. La existencia de diferencias significativas debidas a enmiendas orgánicas, al control o a la solución nutritiva sobre la biomasa aérea, radicular y de la planta, fitotoxicidad y los contenidos en C y N se comprobó utilizando un ANOVA de una vía y el test a posteriori de Fisher para cada una de las plantas ensayadas. De forma general, se utilizó un nivel de significación $\alpha = 0.05$.

5. RESULTADOS

5.1. Efectos de las distintas enmiendas orgánicas en el porcentaje de germinación del girasol y guisante

La figura 21 muestra qué porcentaje de las 10 semillas germinaron bajo los distintos tratamientos ensayados. Para el caso del guisante, los mayores porcentajes de germinación ($> 60\%$) se obtuvieron con solución nutritiva, bokashi y control, y no hubo diferencias significativas entre ellos. Sin embargo, cuándo las plantas recibieron compost, se detectaron los menores porcentajes de germinación ($< 40\%$). Aquellas plantas de guisante que recibieron biochar mostraron porcentajes de germinación intermedios (entre $40 - 60\%$).

Los porcentajes de germinación para el girasol ($> 80\%$) fueron, en general, superiores a los calculados para el guisante. Tras la aplicación de todas las enmiendas orgánicas y la solución nutritiva, el porcentaje de germinación fue superior a aquel del control, aunque los valores entre éste del control y con la solución nutritiva no fue estadísticamente significativo.

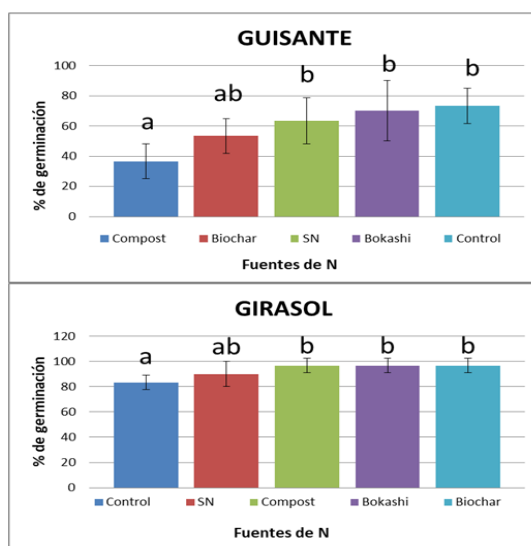


Figura 21. Porcentaje de germinación del guisante y del girasol para las distintas fuentes de materia orgánica, el control y con solución nutritiva. Se exponen el promedio y la desviación típica (barras) de 3 réplicas. Letras distintas denotan diferencias significativas ($P < 0.05$, Anova de una vía y test a posteriori de Fisher).

5.2. Efectos de las distintas enmiendas orgánicas en la producción de la biomasa total (BT), aérea (BA), radicular (BR), y la relación BA/BR del guisante.

La figura 22 muestra la cantidad de biomasa cosechada en distintas partes de la planta sometida a los distintos tratamientos. La biomasa aérea cuando se añadió el bokashi fue de 1,4 veces superior al control, aunque bajo la solución nutritiva fue significante mayor que en los otros tratamientos. La biomasa cosechada con compost, y biochar no fue significativamente distinta de aquella del control.

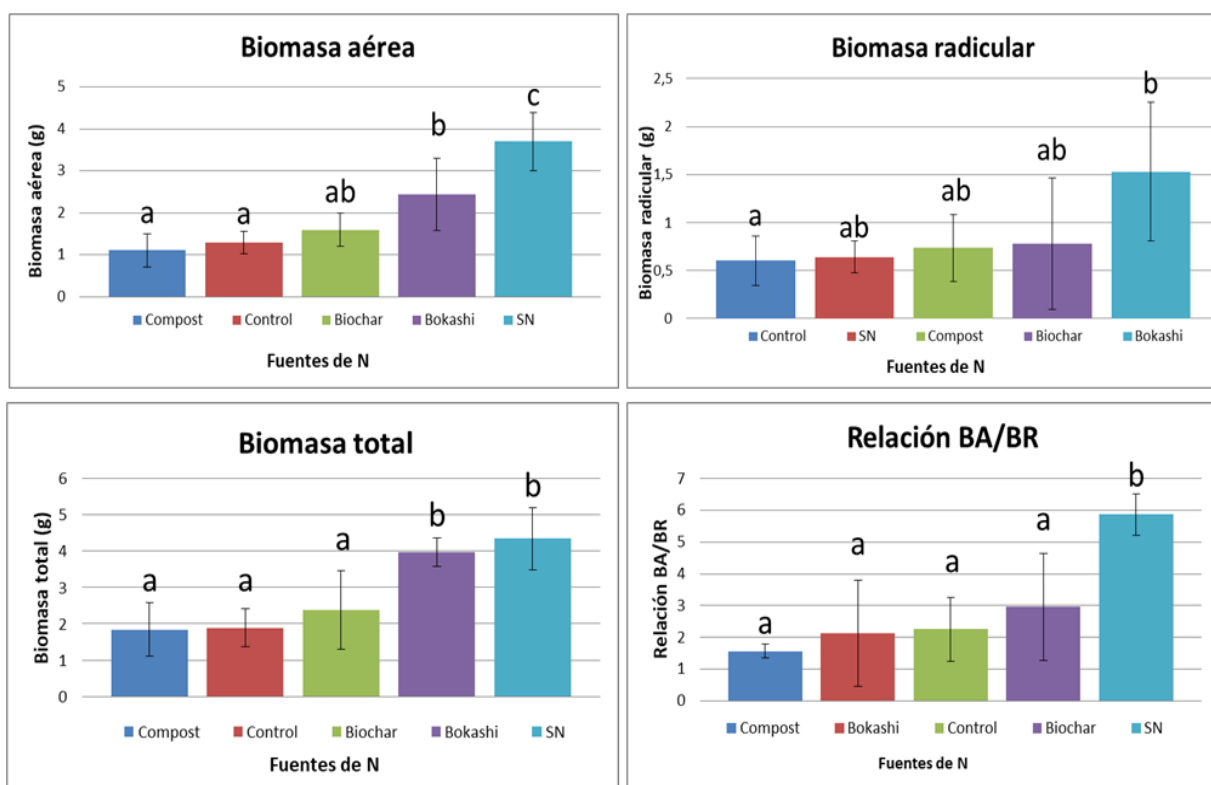


Figura 22. Biomasa de guisante cosechada en macetas con los distintos tratamientos. Se exponen el promedio y la desviación típica (barras) de 3 réplicas. Letras distintas denotan diferencias significativas ($P < 0.05$, Anova de una vía y test a posteriori de Fisher).

La biomasa radicular cuando se añadió Bokashi fue 2,55 veces superior al control, mientras que para el resto de fuentes de variación no hubo diferencias significativas con respecto al control. La relación biomasa aérea/radicular osciló entre 1 y 3 para aquellas plantas que recibieron una fuente de materia orgánica y no

fueron significativamente distintos que la del control. Sin embargo, con la solución nutritiva esta fue de 2,60 veces superior respecto al control.

La mayor cantidad de biomasa total cosechada correspondió a aquellas plantas que recibieron la solución nutritiva (4.2 gr) y bokashi (3.9 gr) sin que hubiera diferencias entre ambos tratamientos. La biomasa cosechada en estos dos tratamientos fue, aproximadamente, el doble a la cosechada con biochar, compost o en el control.

5.3. Efectos de las distintas enmiendas orgánicas en la producción de la biomasa total (BT), aérea (BA), radicular (BR), y BA/BR del girasol.

La biomasa total, aérea y radicular cosechadas en plantas de girasol sometidas a las distintas enmiendas orgánicas y a la solución nutritiva fueron significativamente mayor que aquellas del control. Destaca especialmente la producción de biomasa con el bokashi, que fue entre 2.97 y 3.33 veces superior que el control (figura 23). No hubo diferencias significativas de la relación BA/BR exceptuando aquellas plantas cultivadas con la solución nutritiva.

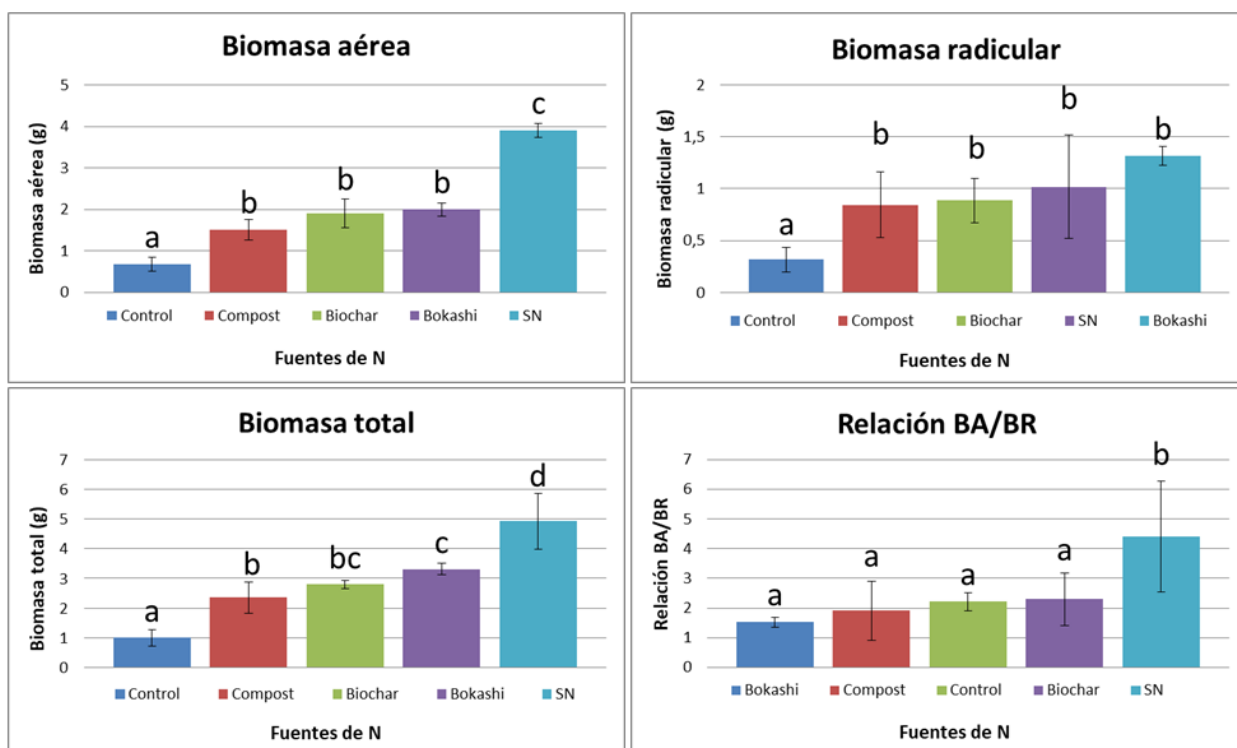




Figura 23. Biomasa aérea, radicular y total, y la relación biomasa aérea/radicular (BA/BR) en plantas de girasol con los distintos tratamientos. Letras distintas denotan diferencias significativas (ANOVA de una vía y test *a posteriori* de Fisher, $P < 0.05$). Los valores son el promedio de 3 réplicas y las barras son la desviación típica.

5.4. Nitrógeno potencialmente mineralizable

Tanto la concentración de N en forma de amonio como la cantidad de N potencialmente mineralizable fueron significativamente mayores para el compost y mínimas para el biochar (tabla 3). Los valores para el bokashi fueron intermedios.

Fuentes de materia orgánica	Concentración de amonio ($\mu\text{g N-NH}_4^+ \text{ g}^{-1}$)	N potencialmente mineralizable ($\mu\text{g de N g}^{-1}$)
Bokashi	14.9a $\pm$ 0.48	86.5a $\pm$ 5.55
Biochar	3.4b $\pm$ 0.73	1.2b $\pm$ 0.65
Compost	38.5c $\pm$ 2.10	405.2c $\pm$ 30.5

Tabla 3. Concentración de N en forma de amonio y cantidad de N potencialmente mineralizable en las fuentes de materia orgánica ensayadas. Los valores corresponden al promedio y la desviación típica (barras) de 3 réplicas. Letras distintas denotan diferencias significativas ($P < 0.05$, Anova de una vía y test *a posteriori* de Fisher).

5.5. Test de fitotoxicidad

La tabla 4 muestra los valores del índice de germinación calculado para las distintas enmiendas orgánicas. En todos los casos, el valor no sólo estuvo por encima del 80 % sino que fueron incluso superiores al 100%. Esto indica que las enmiendas orgánicas utilizadas potencian el crecimiento de la planta modelo utilizada en el ensayo. En este caso, las fuentes de materia orgánica utilizadas tuvieron un efecto fertilizante. Con el bokashi se obtuvo el máximo valor y con el biochar el mínimo, aunque no se pudo establecer si estas diferencias fueron significativas.



Fuentes de materia orgánica	Índice de germinación (%)
Biochar	129.6
Bokashi	181.3
Compost	164.5

Tabla 4. Valores del índice de germinación (%) para las enmiendas orgánicas utilizadas en este estudio.

5.6. Contenidos en carbono y nitrógeno en la biomasa cosechada

5.6.1. Contenidos en carbono y nitrógeno en la biomasa cosechada del guisante

La concentración de nitrógeno y carbono para la biomasa del guisante y bajo los distintos tratamientos se muestra en las tablas 5 y 6.

Tratamiento	Concentración de N (%) en biomasa aérea	C/N biomasa aérea	Concentración de N (%) en biomasa radicular	C/N biomasa radicular	Concentración de N (%) en biomasa total	C/N biomasa total
Compost	2.27a $\pm$ 1.01	13.16c $\pm$ 2.24	1.87a $\pm$ 0.23	12.8b $\pm$ 0.68	2.14a $\pm$ 0.65	12.81b $\pm$ 1.61
Bokashi	3.65ab $\pm$ 0.24	10.91c $\pm$ 0.48	1.92a $\pm$ 0.88	13.5b $\pm$ 1.1	2.84ab $\pm$ 0.64	11.54b $\pm$ 0.62
Biochar	4.03b $\pm$ 0.39	10.44bc $\pm$ 0.86	3.49ab $\pm$ 1.48	10.8ab $\pm$ 2.9	3.72bc $\pm$ 0.70	10.53b $\pm$ 1.08
SN	5.85c $\pm$ 0.32	6.46a $\pm$ 0.33	4.49b $\pm$ 1.17	7.74a $\pm$ 2.4	5.64d $\pm$ 0.45	6.58a $\pm$ 0.49
Control	5.56c $\pm$ 0.92	7.77ab $\pm$ 1.39	4.60b $\pm$ 0.95	8.58a $\pm$ 1.0	5.26cd $\pm$ 0.96	7.98a $\pm$ 1.30

Tabla 5. Contenido en nitrógeno en parte aérea, radicular y total, y relación C/N en plantas de guisante sometidas a los distintos tratamientos. Los valores corresponden al promedio $\pm$ la desviación típica de 3 réplicas. Letras distintas denotan diferencias significativas ($P < 0.05$, Anova de una vía y test a posteriori de Fisher).



Tanto el contenido en N en la biomasa aérea como radicular en las plantas de guisantes control (5.5 y 4.6 % N para la parte aérea y radicular, respectivamente) y con solución nutritiva (5.8 y 4.5 % N) fueron significativamente mayores que los encontrados con las enmiendas orgánicas (< 4 % N). En todos los casos, los valores más bajos se obtuvieron en el guisante cultivado con compost, aunque éstos no fueron significativamente distintos del bokashi. La relación C/N de la biomasa aérea y radicular de las plantas de guisante incubadas con las enmiendas orgánicas osciló, en promedio, entre 10.4 y 13.5 y fueron significativamente superiores a aquella encontrada para el guisante control (7.7 – 8.5) y aquel con la solución nutritiva (6.4-7.7).

Tratamiento	Aérea	Radicular	Total
Compost	28.8 a $\pm$ 14.15	24.1 a $\pm$ 4.77	27.2 a $\pm$ 8.37
Bokashi	39.8 ab $\pm$ 1.56	25.1 a $\pm$ 11.98	32.4 ab $\pm$ 5.58
Biochar	41.8 b $\pm$ 0.72	33.4 a $\pm$ 10.54	38.5 b $\pm$ 4.12
SN	37.7 ab $\pm$ 0.27	32.5 a $\pm$ 5.93	36.9 ab $\pm$ 0.91
Control	41.9 b $\pm$ 0.81	38.5 a $\pm$ 5.34	40.7 b $\pm$ 1.53

Tabla 6. Contenido en carbono (%) en parte aérea, radicular y total del guisante para cada tratamiento. Los valores son el promedio $\pm$ desviación típica de tres réplicas. Distintas letras denotan diferencias significativas (Anova de una vía y test a posterior de Fisher; $P < 0.05$).

El contenido de carbono en la biomasa aérea del guisante fue significativamente mayor en aquel del control (41.9 % en promedio) y tratadas con biochar (41.8 %) con respecto al resto, obteniéndose los menores contenido en carbono en las tratadas con compost (28.8 % en promedio). Un patrón similar, aunque las diferencias no fueron significativas, se detectó para el contenido en C en la biomasa radicular y para la biomasa total del guisante, dónde si hubo diferencias significativas.

Nitrógeno y carbono cosechado en la biomasa total

La cantidad de N en la parte radicular del guisante fue muy inferior aquella en la parte aérea, con excepción de las plantas de guisante con compost en las que la cantidad de N en la parte aérea y radicular fue similar (figura 24). Las mayores cantidades de N en el conjunto de la planta de guisante, se obtuvieron en aquellas con solución nutritiva, seguidas de aquellas con bokashi (figura 24). Las menores cantidades se obtuvieron con compost. Se obtuvo un patrón similar para la cantidad de carbono en las distintas partes de la planta del guisante; mayores cantidades acumuladas en las plantas sometidas a la solución nutritiva y con bokashi, y las menores en las plantas con compost (figura 25).

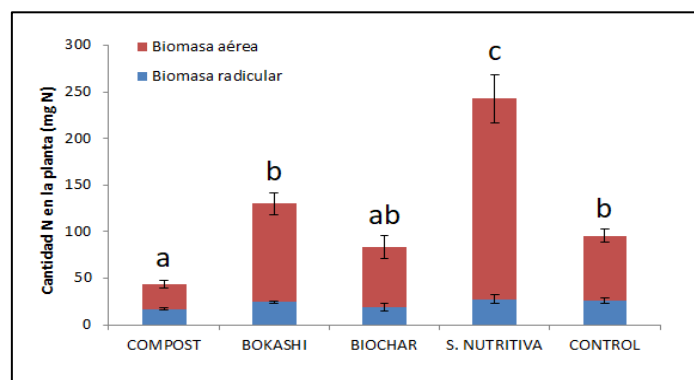


Figura 24. Nitrógeno cosechado en la biomasa aérea y radicular del guisante bajo los distintos tratamientos. Los valores son el promedio y se exponen la desviación típica de tres réplicas. Distintas letras denotan diferencias significativas (Anova de una vía y test a posterior de Fisher; $P < 0.05$).

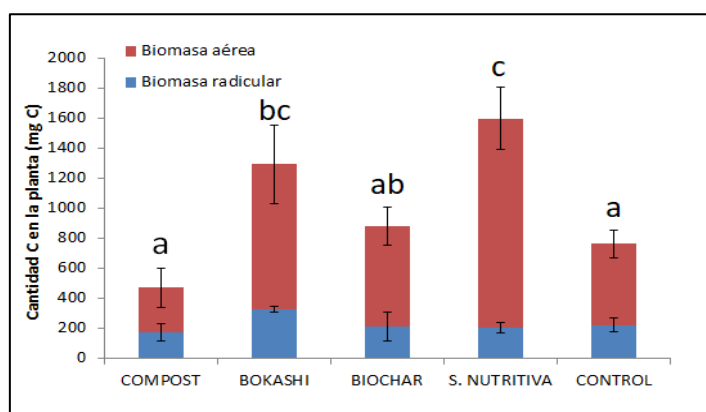


Figura 25. Carbono cosechado en la biomasa aérea y radicular del guisante bajo los distintos tratamientos. Los valores son el promedio y se exponen la desviación típica de tres réplicas. Distintas letras denotan diferencias significativas (Anova de una vía y test a posterior de Fisher; $P < 0.05$).



5.6.2. Contenidos en carbono y nitrógeno en la biomasa cosechada del girasol

La concentración de nitrógeno y carbono para la biomasa del girasol y bajo los distintos tratamientos se muestra en las tablas 7 y 8.

Tratamiento	Concentración de N (%) en biomasa aérea	C/N biomasa aérea	Concentración de N (%) en biomasa radicular	C/N biomasa radicular	Concentración de N (%) en biomasa total	C/N biomasa total
Compost	1.13 a ± 0.04	32.46 c ± 2.05	0.75 ab ± 0.10	43.34 b ± 6.28	0.99 a ± 0.01	35.11 c ± 1.35
Bokashi	1.16 a ± 0.08	30.37 c ± 4.04	0.41 a ± 0.18	76.82 c ± 23.32	0.85 a ± 0.11	37.56 c ± 3.55
Biochar	1.15 a ± 0.12	32.38 c ± 3.97	0.32 a ± 0.04	73.09 c ± 6.81	0.89 a ± 0.12	37.26 c ± 5.99
SN	4.30 c ± 0.56	7.50 a ± 0.82	2.97 c ± 0.63	7.83 a ± 0.64	4.02 c ± 0.61	7.52 a ± 0.71
Control	2.22 b ± 0.27	17.44 b ± 1.18	1.17 b ± 0.25	26.72 ab ± 3.56	1.90 b ± 0.26	19.19 b ± 1.39

Tabla 7. Contenido en nitrógeno en la parte aérea, radicular y total del girasol. Los valores son el promedio $\pm$ desviación típica de tres réplicas. Distintas letras denotan diferencias significativas (Anova de una vía y test a posterior de Fisher; $P < 0.05$)

El mayor contenido en N tanto de la parte aérea (4.3 %) y radicular (2.9 %) en la planta en su conjunto (4.02 %) se observó en las plantas de girasol con la solución nutritiva (tabla 7). Para aquellas plantas incubadas con las enmiendas orgánicas, se obtuvieron los menores porcentajes de N (tabla 7), sin que hubiese diferencias significativas entre ellas. Las plantas de girasol control, mostraron contenidos en N entre aquellos de las plantas con solución nutritiva y con las enmiendas orgánicas.

La relación C/N del conjunto de la planta osciló entre 35.1 – 37.2 que se obtuvieron en las distintas enmiendas orgánicas y 7.5 de las plantas con solución nutritiva. Para las plantas control, ésta relación promedió 19.2.



Tratamiento	Aérea	Radicular	Total
Compost	36.6 b $\pm$ 0.79	31.8 a $\pm$ 0.78	34.9 bc $\pm$ 1.02
Bokashi	34.4 ab $\pm$ 2.46	26.9 a $\pm$ 4.97	31.6 ab $\pm$ 1.07
Biochar	36.7 b $\pm$ 0.24	23.6 a $\pm$ 3.87	32.6 abc $\pm$ 0.95
SN	31.8 a $\pm$ 1.57	23.6 a $\pm$ 6.68	29.9 a $\pm$ 2.95
Control	38.6 b $\pm$ 3.58	30.4 a $\pm$ 3.31	36.1 c $\pm$ 2.88

Tabla 8. Contenido en carbono (%) en la parte aérea, radicular y total del girasol. Los valores son el promedio $\pm$ desviación típica de tres réplicas. Distintas letras denotan diferencias significativas (Anova de una vía y test a posterior de Fisher; $P < 0.05$).

El contenido de carbono en la parte aérea del girasol con bokashi y la SN fue significativamente inferior al del resto de los tratamientos, sin que haya diferencias significativas entre aquel obtenido para el control e incubadas con compost y biochar. Sin embargo, estas diferencias no se encuentran para la parte radicular, pero el patrón se sigue cuando se tiene en cuenta la planta por completo (Tabla 8).

Nitrógeno y carbono cosechado en la biomasa total

La cantidad de nitrógeno cosechado en la biomasa total del girasol con la solución nutritiva fue de hasta 11 veces superior al control (figura 26). No hubo diferencias significativas entre el resto de los tratamientos (figura 26). Para el caso del carbono cosechado, existen diferencias significativas para los distintos tratamientos.

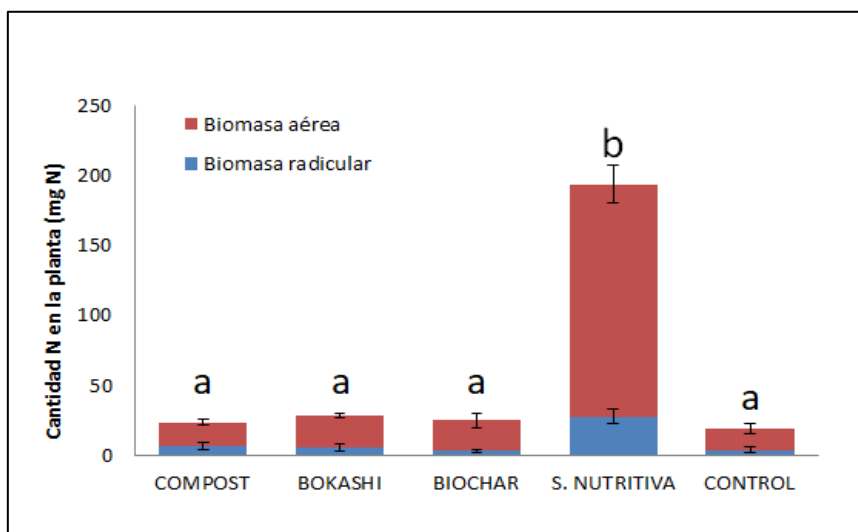


Figura 26. Nitrógeno cosechado en la biomasa aérea y radicular del girasol bajo los distintos tratamientos. Los valores son el promedio y se exponen la desviación típica de tres réplicas. Distintas letras denotan diferencias significativas (Anova de una vía y test a posterior de Fisher; $P < 0.05$).

La mayor cantidad de C cosechado se obtuvo para el girasol con solución nutritiva seguido de aquellas plantas con bokashi (figura 27). Las plantas control mostraron las menores cantidad de C cosechado.

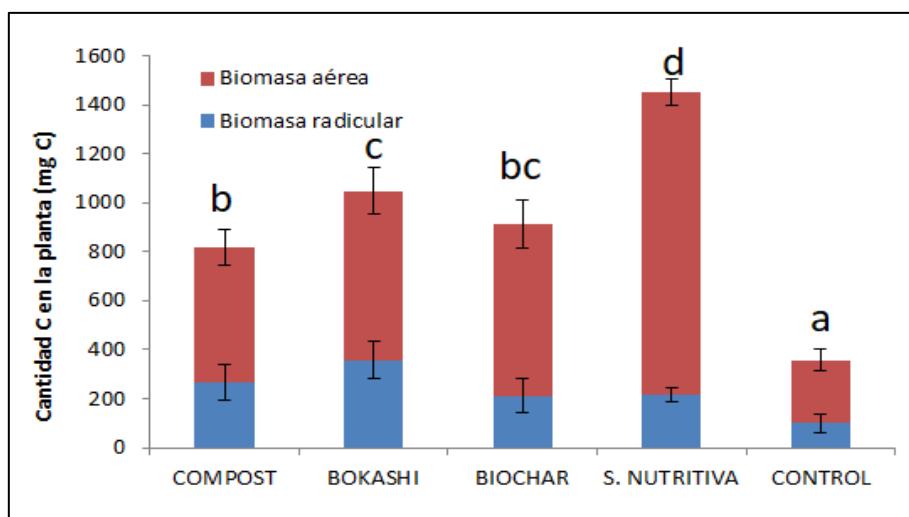


Figura 27. Carbono cosechado en a biomasa aérea y radicular del girasol bajo los distintos tratamientos. Los valores son el promedio y se exponen la desviación típica de tres réplicas. Distintas letras denotan diferencias significativas (Anova de una vía y test a posterior de Fisher; $P < 0.05$).



6. DISCUSIÓN

La biomasa aérea, radicular y total, y el porcentaje de germinación para ambas plantas aumentaron de forma significativa cuándo se incubaron con la solución nutritiva con respecto a las plantas control. La cantidad de carbono cosechado, así como la del nitrógeno, tanto para la parte aérea y radicular en ambos casos, fue superior también con la aplicación de solución nutritiva, así como para las distintas enmiendas orgánicas con respecto a las plantas control, ya que estas últimas estaban sometidas a estrés nutricional al no disponer de ningún tipo de nutrientes. El hecho que dichos resultados fuesen máximos con la solución nutritiva no fue inesperado. Cuando otros factores son óptimos, tales como temperatura, luz y disponibilidad de agua, el adecuado crecimiento de las plantas depende, principalmente, de la disponibilidad de macro (nitrógeno, fósforo y potasio) y micronutrientes. Los macro y micronutrientes suministrados con la solución nutritiva estaba en sus formas disponibles y, por tanto, era de esperar que el crecimiento, y la cantidad de carbono y nitrógeno cosechados, fueran los máximos. Es interesante señalar, que el carbono cosechado, así como el porcentaje de carbono para ambas plantas, fue mayor en la parte aérea (hojas y tallo) frente a la radicular (raíces), lo que quiere decir que se trataba de la fuente limitante según la teoría óptima (Bloom *et al.*, 1985), que establece que una planta dirige el carbono hacia el órgano que adquiere la fuente más limitante.

El incremento de más del doble de la cantidad de biomasa y de carbono cosechado en presencia del bokashi, biochar y compost, con respecto al control demuestra que estas fuentes de materia orgánica propiciaron las condiciones óptimas para el desarrollo del girasol. Sin embargo, no hubo diferencias significativas en la cantidad de N cosechado, aunque hubo una tendencia de mayores cantidades con las enmiendas respecto al control. Este hecho denota que estas enmiendas no proporcionaron suficientes cantidades de N disponible, aunque probablemente sí de otros macro, por ejemplo potasio, y micronutrientes, que explicarían el mayor incremento en biomasa y carbono. Esta mayor biomasa y carbono cosechados con similares cantidades de N cosechado, explican los



porcentajes de N tan bajos, con respecto al control, tanto de la biomasa aérea como de la radicular y total. Así es, una cantidad similar de N disponible se ha diluido en mayor cantidad de biomasa resultando en contenidos porcentuales inferiores. Es decir, la eficiencia de uso del N (biomasa y cantidad de carbono cosechados por unidad de N) de las plantas de girasol incubadas con bokashi, biochar y compost fueron mucho más elevada que la del control. Esto también explica las elevadas relaciones C/N de las plantas con respecto a aquellas incubadas con la solución nutritiva y el control, donde el valor inferior de la solución nutritiva nos indica que las plantas no se han visto limitadas por el nitrógeno.

Cambios en las relaciones estequiométricas carbono:nutrientes tienen como respuesta cambios en factores ambientales claves, tales como la luz y la disponibilidad de nutrientes (Di Palo y Fornara, 2015). Por ejemplo, estos mismos autores encontraron, usando un análisis de regresión lineal, que la razón C/N tanto de la parte aérea como radicular de las plantas se incrementó de forma significativa cuánto menor era la disponibilidad de N. Por tanto, estos resultados sugieren que, aunque las enmiendas no suministraron de forma significativa más N disponible a las plantas de girasol con respecto al control, si promovieron una mayor biomasa y carbono cosechado.

La baja disponibilidad de N en las macetas con plantas de girasol y con las enmiendas orgánicas puede ser debido a bajos valores de mineralización del N orgánico proporcionado por éstas, al menos durante el periodo de incubación de aproximadamente un mes del experimento. Teniendo en cuenta la cantidad de cada enmienda añadido en cada maceta y el potencial de N mineralizable del N orgánico añadido en cada enmienda, se estima que 1.4, 2.1 y 0.014 mg N estuvo disponible para la planta de girasol sometida al bokashi, compost y biochar, respectivamente. Estos valores son muy inferiores a la cantidad de N cosechado lo que sugiere que durante el periodo de incubación la cantidad de N mineralizado fue muy inferior a la cantidad de N demandado por el girasol. Para el caso del biochar, el bajo nitrógeno disponible para las plantas es explicable, ya que la relación C/N fue de 81, lo que significa un exceso de carbono y una deficiente disponibilidad de N, de ahí que el



porcentaje de nitrógeno fuese bajo en ambas plantas para el biochar respecto a las demás enmiendas, así como menor nitrógeno potencialmente mineralizable.

Es posible que otros factores no controlados y medidos en este experimento hayan influido de forma positiva en el crecimiento del girasol. Este, por ejemplo, podría ser el caso del potasio. El potasio es un elemento que no forma parte de la materia orgánica y, por tanto, se libera al suelo como disponible tras la aplicación de fuentes de materia orgánica sin que medien procesos de mineralización por parte de los microorganismos. Es posible que, al añadir las enmiendas orgánicas, los niveles de potasio disponible hayan aumentado, actuando de forma sinérgica con los bajos niveles de N disponible. Havlin *et al.* (2005) mostraron muchos ejemplos del notable incremento de biomasa para distintos cultivos con bajos niveles de N en presencia de potasio. Esto podría explicar el incremento en la biomasa y carbono cosechados en las plantas de girasol incubadas con las enmiendas con respecto al control, a pesar de que los niveles de N cosechados fueran similares. Se requieren de más estudios dirigidos a evaluar el grado de sinergismo de otros factores no evaluados en este experimento.

Para el caso del guisante, sólo aquellas plantas incubadas con la solución nutritiva y con bokashi mostraron mayor biomasa total con respecto al control. También hubo una tendencia clara, aunque no significativa, de que la cantidad de N cosechado con el bokashi fue superior a aquella en las plantas control. Este hecho refuerza la conclusión antes mencionada de que la aplicación del bokashi favoreció el adecuado desarrollo del guisante a través del sinergismo provocado por otro factor no medido durante el experimento, aunque no fue el caso para el compost ni biochar. La menor cantidad de biomasa, carbono y nitrógeno cosechados, se obtuvo en las plantas de guisante incubadas con compost, que coincide con la enmienda orgánica con los menores valores del porcentaje de germinación para el girasol. La menor cantidad de biomasa, carbono y nitrógeno cosechados se explica por el menor número de plantas (menor % de germinación) desarrolladas bajo este tratamiento. Sin embargo, aquellas semillas que sí germinaron y que dieron lugar a plantas mostraron los menores porcentajes de N y C, lo que denota un desarrollo sub-óptimo en comparación con los otros tratamientos. Todo esto contrasta con el



hecho de que tanto el contenido en N (1.92 % N) como la relación C/N (13) del compost está dentro del rango de valores considerados como adecuados para su uso como fertilizante orgánico (Havlin *et al.*, 2005). No se dispone de datos suficiente para determinar con precisión porqué un menor número de semillas de girasol germinaron y porqué los contenidos en C y N en las plantas de guisante con compost fueron los menores. Una proporción elevada del compost estaba compuesto por estiércol fresco y no estabilizado de vaca. Es posible que cambios en el pH y la presencia de microorganismos indeseados patógenos en éste, hayan contribuido en la germinación y desarrollo del guisante, pero no en el girasol. El hecho de que para el caso del compost la liberación del nitrógeno mineral fuese superior al resto de las enmiendas, era debido al contenido de estiércol fresco, puesto que en su composición existe un alto contenido de nitrógeno en forma de urea. Por otro lado, cuando la relación C/N es baja (inferior a 18-19), el compostaje se lleva a cabo con mayor rapidez (Golueke *et al.*, 1987; Zhu, 2006). Lo que quiere decir, que a veces un exceso de nitrógeno puede resultar en pobre sistema radicular, tejido blando, plantas débiles, entre otros. De ahí quizás, que el bokashi se comportara mejor, ya que su relación C/N (20) estaba dentro de lo que se considera equilibrio $20 < C/N \leq 30$, y no existe ningún tipo de exceso de nitrógeno como es el caso del compost, pese a que este último sea adecuado y óptimo como fertilizante orgánico.

Las fuentes de materia orgánica utilizadas no resultaron ser fitotóxicas, puesto que los valores de fitotoxicidad fueron superiores al 80% en todos los casos. Esto indica que estas potenciaban el crecimiento de las plantas modelo utilizadas en el ensayo, siendo el bokashi el que obtuvo el máximo valor. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este test se realizó con semillas de rábano, así que sería conveniente que se llevara a cabo este test para las semillas de girasol y guisante, ya que los valores resultantes podrían resultar totalmente opuestos a los que se obtuvieron con las semillas de rábano.

Es importante señalar, que la cantidad de N en las plantas control tanto del girasol y guisante proviene, al menos en parte para el caso del guisante, del nitrógeno almacenado en la semilla en forma de reserva proteica. Sin embargo, no



se descarta que parte de la cantidad de N cosechado en el guisante, cuyos valores fueron aproximadamente del doble que en el girasol, provenga de fijación de N atmosférico. De hecho, Navarro Blaya, and Navarro García, G., (1984) afirman que existen rizobios de “crecimiento lento”, que pueden fijar nitrógeno en medios totalmente libres de materia vegetal, sin necesidad de que se hayan formado nódulos en la planta.

7. CONCLUSIONES

1.- El bokashi, biochar y compost incrementaron significativamente la biomasa y el carbono cosechado de plantas de girasol con respecto al control, aunque los mayores valores se obtuvieron para aquellas incubadas con la solución nutritiva. Sin embargo, la cantidad de N cosechado no fue significativamente distinta del control, lo que sugiere: i) la mineralización del N de estas fuentes de materia orgánica no suministró suficiente N disponible durante el corto periodo de incubación, y ii) otros factores/variables condicionados por estas enmiendas orgánicas actuaron de forma sinérgica.

2.- La enmienda orgánica que resultó más óptima para el caso del guisante fue el bokashi. Los mayores porcentajes de germinación en el guisante y la mayor cantidad de biomasa y carbono y nitrógeno cosechados se observaron para esta fuente de materia orgánica.

El biochar resultó ser la enmienda menos idónea. La relación C/N de éste fue la más alta y contuvo los valores más bajos de nitrógeno potencialmente mineralizable.

4.- La biomasa, carbono y nitrógenos cosechados, y el índice de germinación, en las plantas de guisante con el compost fueron lo más bajos. El alto contenido en estiércol fresco de vaca del compost confirió, probablemente, poca estabilidad a esta enmienda orgánica.



5.- La mineralización del N de las enmiendas orgánicas no proporcionó niveles de N disponible adecuados en las condiciones de experimentación. Se recomienda aportar más cantidad de estas enmiendas para reducir las posibles limitaciones del crecimiento derivadas de bajos niveles de N disponible.

6.- En términos generales, el bokashi se perfiló como la enmienda orgánica más adecuada para promover el crecimiento de plantas en sistemas agrícolas con suelos de baja fertilidad y sin posibilidad de adquirir fuentes de nutrientes del exterior, como es el caso de la agricultura de Burundi.

8. BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA

Bibliografía

Alburquerque, J.A., Calero, J.M., Vidal Barrón, Torrent, J., del Campillo, M.C., Gallardo, A., and Villar, G., J. (2014). Plant growth responses to biochar amendment of Mediterranean soils deficient in iron and phosphorus. *Plant Nutr. Soil Sci.* 177, (16-25).

Bloom, A. J., Chapin, F.S., Mooney, H. A., (1985). Resource limitation in plants-an economic analogy. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 1985. 16:363-92. Annual Reviews Inc.

Bueno Márquez, P., Díaz Blanco, Manuel J., Cabrera Capitán, F., (2008). Factores que afectan al proceso de Compostaje. Mundi Prensa Libros S.A. ISBN: 978-84-8476-346-8 84-8476-346-3.

Cabrera Capitán, F., (2007). Materia orgánica del suelo: Papel de las enmiendas orgánicas. Conferencia sobre "Componentes del suelo: estructuras y funciones en la agricultura y medio ambiente".

Cortijo, J., Gimeno, H., (2012). El abonado del girasol como mantenimiento de la fertilidad del suelo. Fertiberia. www.fertiberia.com.



Cronje, A., Turner, C., Williams, A. (2003). Composting under controlled conditions. *Environ. Technol.* 24 (10): 1221-1234.

Di Palo, F., and D. Fornara. (2015). Soil fertility and the carbon: nutrient stoichiometry of herbaceous plant species. *Ecosphere* 6(12):273. <http://dx.doi.org/10.1890/ES15-00451.1>.

F. Sheldrick, W., Lingard, J., Food Policy (2004). The use of nutrient audits to determine nutrient balances in Africa. *Food Policy*. (61-68) (www.elsevier.com/locate/foodpol).

FAO and AECID (2011). Uso y elaboración del Bokashi. Programa especial para la seguridad alimentaria pesa en el Salvador. GCP/ELS/007/SPA.

Frasier, I., Quiroga, A., Noellemeyer, E., (2015). Contribución de las raíces a la dinámica de carbono de la biomasa microbiana del suelo. (AACS) Asociación Argentina Ciencia del Suelo.

Golueke, C.G., Diaz, L.F.(1987). Composting and the Limiting Factors Principle. *Biocycle*, 28 (4): 22-25.

Haug, R.T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers. Boca Raton. Florida.

Havlin, J., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., Nelson, W.L., (2005). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. Pearson Prentice Hall, New Jersey.

Hee Park, J., Kumar Choppala, G., Sirangie Bolan, N., Woo Chung, J., Chuasavathi, T., (2011). Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant Soil*, 348:439-451. doi 10.1007/S11104-011-0948-y.

Jones, A., Breuning-Madsen, H., Brossard, M., Dampha, A., Deckers, J., Dewitte, O., Gallali, T., Hallett, S., Jones, R., Kilasara, M., Le Roux, P., Micheli, E., Montanarella, L., Spaargaren, O., Thiombiano, L., Van Ranst, E., Yemefack, M., Zougmore, R., eds, (2013). *Soil Atlas of Africa*. European Commission, Publications Office of the



European Union, Luxembourg. Part 1. Bokashi (30), Acrisoles (52), Ferrasoles (53), Nitisoles (55). Part 2. (pages 32-33).

Jones, T., (2006). The scoop on dirt: Why we should all worship the ground we walk on. E—The Environmental Magazine. <http://www.emagazine.com/archive/3344> Inter Academy Council (IAC).

Knowling, D. (2014). Ecological Restoration: Wildfire Ecology Reference Manual. Paperback. ISBN: 978-1365453458.

Le Gouvernement de la République du Burundi Et L'Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO). (CPP 2012 - 2016).

Lean, Geoffrey., (2008). "Ancient skills could reverse global warming". The Independent, <http://www.independent.co.uk/environment/climate-change/ancient-skills-could-reverse-globalwarming-1055700.html>.

Morales Hernández, J., Gómez Romero, M., Velázquez Becerra, C., Ambriz Parra, E., (2016). Variación de la distribución de carbono entre la raíz y la parte aérea en tres especies de pino. Rev. mex. de cienc. forestales vol.7 no.38 México. Versión impresa ISSN 2007-1132.

Moreno Casco. J, Moral Herrero, R. (2008). Compostaje. Eds. Científicos. ISBN 10: 8484763463 / ISBN 13: 9788484763468. (Pág 95 y 308-309).

Nakasaki, K., Nag, K. Karita, S. (2005). Microbial succession associated with organic matter decomposition during thermophilic composting of organic waste. Waste Manag. Res. 23 (1): 48-56.

Navarro Blaya, S., Navarro García, G., (1984). Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida. Mundi Prensa Libros S.A. ISBN 848476155X, 9788484761556.

Ndameu, B. Anthony., (2011). "Biochar Fund Trials in Cameroon: Hype and Unfulfilled Promises". www.biofuelwatch.net.

ONE.ORG/40Chances. (2013). A "Brown Revolution" for Better Soil Health in Africa.



Paz-Ferreiro, J., Gascó, G., Méndez, A., Sohi, S., Glaser, B. (2015). European Geosciences Union General Assembly. SSS5.8 Future challenges in biochar research.

Pretty J. (2009). Agroecological Approaches to Agricultural Development. World Development Report.

Rodríguez, N. S., Ruz, E., Chavarría, J., (1993). Principios básicos de acidez del suelo. Instituto de investigaciones agropecuarias estación experimental Quilamapu. IPA QUILAMAPU Nº 57.

Schinner, F., Kandeler, E., Öhlinger, R., Margesin, R., (1995). Methods in Soil Biology. Springer. ISBN 978-3-642-60966-4.

Shih-Hao, J., Chung-Chi, W., Chia-Hsing, L., Tsung-Yu, L., (2015). Stabilization of Organic Matter by Biochar Application in Compost-amended Soils with Contrasting pH Values and Textures. ISSN 2071-1050. www.mdpi.com/journal/sustainability.

Soliva, M., López, M., (2004). Calidad del compost: Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso. Formación de técnicos para el tratamiento y gestión de lodos de depuradora. Valsaín, CENEAM/MIMAM.

The Royal Society. (2009). “Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty”. Excellence in Science. ISBN: 978-0-85403-773-5.

Woolf, D., E. Amonette, J., Street-Perrott, F. Alayne., Lehmann, J., Stephen. J., (2010). “Sustainable biochar to mitigate global climate change”. Nature Communications 1 (5): 1–9. Bibcode:2010NatCo...1E..56W. doi:10.1038/ncomms1053. ISSN2041-1723.

Zhu, N.W. (2006). Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilot-scale aerated static bin system. Biores. Technol. 97 (15): 1870-1875.

Zucconi F., Forte M., Monaco A., De Bertoldi M., (1981). Biological evaluation of compost maturity. BioCycle 22, 27-29.



Webgrafía

African Development Bank Group

www.afdb.org

Burundi Data Portal

burundi.opendataforafrica.org

Central Intelligence Agency

www.cia.gov

Climate Data

es.climate-data.org

Commission des Forêts d’Afrique Centrale

comifac.org

Enciclopedia Britannica (Kahan Eggers, E., Lemarchand, R.,)

www.britannica.com

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) – FAOSTAT

www.fao.org