

## Modelos Lineales Generalizados en el análisis del uso de desechos agroindustriales en la preparación de enmiendas orgánicas y su efecto en los parámetros de calidad

### GLM regression applied for the analysis of quality parameters in composting agroindustrial wastes

Mariela González-Narváez, Omar Ruiz-Barzola, Eduardo Chávez Navarrete y Mario Solórzano Carvajal

Recepción: 06/06/2022 Aceptación: 04/01/2023 Publicación: 31/01/2023

**Abstract** The large amount of organic waste obtained from agro-industrial production processes are very important materials for organic agriculture, as they can improve the physical, chemical and biological quality of soils. For this reason, a trial was carried out at the “La Troncal” mill, Guayas-Ecuador (2009-2010), to test three combinations of agro-industrial residues; establishing a multifactorial experimental design and examining three different combinations of filter cake, molasses and ash; two sources of microorganisms; and two types of aeration. Regression (Generalized Linear Models) was applied, through the stepwise method, of posterior elimination, to model the relationship between the dependent variable (carbon nitrogen C/N ratio) and the independent or predictive ones: Height, Organic Matter content, Conductivity, Percentage of Organic Matter and Ash in the formula,

---

Mariela González-Narváez, Ph.D.

Docente, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P. O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, e-mail: margonzal@espol.edu.ec,  <http://orcid.org/0000-0002-8747-5257>

Omar Ruiz-Barzola, Ph.D.

Docente, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias de la Vida, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P. O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, e-mail: oruiz@espol.edu.ec,  <http://orcid.org/0000-0001-8206-1744>

Eduardo Chávez Navarrete, Ph.D.

Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias de la Vida, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P. O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, e-mail: fchavez@espol.edu.ec,  <http://orcid.org/0000-0003-2493-8143>

Mario Solórzano Carvajal, M.Sc

Investigador, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Centro de Estudios e Investigaciones Estadísticas, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P. O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, e-mail: mdsolorz@espol.edu.ec,  <https://orcid.org/0000-0001-8682-6652>

Micro-Organisms, Temperature, pH and Aeration. The final model was:  $E[C/N] = -10566,1 + 66,5738 \cdot \text{Altura} - 0,19824 \cdot \text{Altura}^2 - 1,8069 \cdot \text{Altura} \cdot \text{MOCromat} - 0,4597 \cdot \text{Altura} \cdot \text{Temp} - 0,2226 \cdot \text{Conduct} + 0,0015 \cdot \text{Conduct} \cdot F \% \text{Cenizas} + 0,0039 \cdot \text{Conduct} \cdot \text{Temp} - 18,411 \cdot F \% \text{MO} + 0,3609 \cdot F \% \text{MO} \cdot \text{Temp} + 32,0059 \cdot \text{MicroOrgC} + 188,788 \cdot \text{MOCromat} + 299,196 \cdot \text{Temp} - 2,7438 \cdot \text{Temp}^2 + 27,0893 \cdot \text{pH} - 90,2597 \cdot \text{Aireac} + \epsilon$ . Which turned out to be a good explanatory and predictive model to measure dependency and estimate the possible values that the C/N ratio takes based on the initial values of the independent variables. The temperature parameter is the most critical, since compost production is a dynamic process, similarly to pH and conductivity. The probability of obtaining the best compost according to the Monte Carlo method is greater when placing between 33 % and 35 % OM, 19 % Ash and 100 % of the pile is completed with Humidity; applying commercial microorganisms; using turning as aeration method; and having at the beginning of the process the conductivity in values between 2750 and 2850  $\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}$ ; around 55°C of temperature and 7.5 of pH.

**Keywords** compost, generalized linear models, organic amendments, regression .

**Resumen** La gran cantidad de desechos orgánicos obtenidos de procesos de producción agroindustriales, son materiales muy importantes para la agricultura orgánica, pues son capaces de mejorar la calidad física, química y biológica de los suelos. Por ello se realizó un ensayo en el ingenio “La Troncal”, Guayas-Ecuador (2009-2010), para probar tres combinaciones de residuos agroindustriales; estableciéndose un diseño experimental multifactorial y examinar tres diferentes combinaciones de cachaza, melaza y ceniza; dos fuentes de microorganismos; y dos tipos de aireación. Se aplicó Regresión (Modelos Lineales Generalizados), a través del método stepwise, de eliminación posterior, para modelar la relación entre la variable dependiente (relación carbono nitrógeno C/N y las independientes o predictoras: Altura, contenido de Materia Orgánica, Conductividad, Porcentaje de Materia Orgánica y de Ceniza en la fórmula, Micro-Organismos, Temperatura, pH y Aireación. El modelo final fue:  $E[C/N] = -10566,1 + 66,5738 \cdot \text{Altura} - 0,19824 \cdot \text{Altura}^2 - 1,8069 \cdot \text{Altura} \cdot \text{MOCromat} - 0,4597 \cdot \text{Altura} \cdot \text{Temp} - 0,2226 \cdot \text{Conduct} + 0,0015 \cdot \text{Conduct} \cdot F \% \text{Cenizas} + 0,0039 \cdot \text{Conduct} \cdot \text{Temp} - 18,411 \cdot F \% \text{MO} + 0,3609 \cdot F \% \text{MO} \cdot \text{Temp} + 32,0059 \cdot \text{MicroOrgC} + 188,788 \cdot \text{MOCromat} + 299,196 \cdot \text{Temp} - 2,7438 \cdot \text{Temp}^2 + 27,0893 \cdot \text{pH} - 90,2597 \cdot \text{Aireac} + \epsilon$ . El cual resultó ser un buen modelo explicativo y predictivo para medir la dependencia y estimar los posibles valores que tome la relación C/N en función de los valores iniciales de las variables independientes. El parámetro temperatura es el más crítico, dado que la producción del compost es un proceso dinámico, de manera similar el pH y la conductividad. La probabilidad de obtener el mejor compost según el método de Monte Carlo, es mayor al colocar entre 33 % y 35 % de MO, 19 % de Ceniza y se completa el 100 % de la pila con Humedad; aplicando microorganismos comerciales; utilizando como método de aireación el volteo; y teniendo al inicio del proceso la conductividad en valores entre 2750 y 2850  $\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}$ ; alrededor de 55°C de temperatura y 7.5 de pH.

**Palabras Claves** compost, enmiendas orgánicas, modelos lineales generalizados, regresión.

## 1 Introducción

En el mundo existen graves problemas de contaminación generados por el incorrecto manejo de desechos industriales y por el uso excesivo de fertilizantes inorgánicos en la producción agrícola, esto ha generado la disminución de la fracción orgánica de los suelos ante su intenso uso. La conservación de la fertilidad del suelo es una tarea necesaria para mantener su productividad, además, involucra el cumplimiento de uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que se enfoca en garantizar patrones de consumo y producción sostenible para la erradicación de la pobreza (Pezzolla et al., 2021). Por tanto, es importante restituir al suelo las sustancias que se pierden por causa de los procesos de nutrición de las plantas al desarrollarse.

Este panorama, renueva a nivel mundial, el interés por el uso y manejo de los sistemas productivos, tal como, el manejo de las enmiendas agrícolas aplicadas al suelo, para la recuperación, reutilización y/o transformación de los residuos industriales en insumos útiles a los sectores productivos. Los desechos agroindustriales son generados en grandes cantidades durante el proceso de producción, siendo materiales de importancia en la práctica de la agricultura orgánica, pues son capaces de mejorar la calidad física, química y biológica de los suelos.

Una alternativa para el manejo de desechos es la del compostaje que se define como una biotécnica donde es posible ejercer un control sobre los procesos de biodegradación de la materia orgánica. El compostaje al ser realizado con mezclas adecuadas, puede ofrecer productos de alta calidad para su uso como abono, en la restauración de suelos y como sustrato alternativo a la turba y al suelo virgen de montaña (Pezzolla et al., 2021). El compost producto de este proceso, puede colaborar con el mejoramiento de las condiciones edáficas para mejorar la producción de cultivos. Ofreciendo además la posibilidad de incrementar el uso de mano de obra en su procesamiento, obtener producciones ambientalmente sanas, disminuir materia orgánica a eliminar y además posee valor como elemento formativo ambiental. Con el fin de dar soluciones a los problemas de contaminación en el ingenio “La Troncal”, se decidió estandarizar el proceso de compostaje, utilizando los desechos agroindustriales. Además, como técnica de análisis se consideró la aplicación de métodos estadísticos multivariantes, que se han caracterizado en este campo de estudio, por proporcionar resultados robustos referente a la optimización del compostaje y al valor final del compost (de Mendonça Costa et al., 2017).

El objetivo del trabajo es valorar diferentes mezclas de materias primas y determinar cómo afectan éstos a cada uno de los parámetros de calidad del compost como producto final. Para realizar este análisis se utilizó el método estadístico de regresión, el cual ya ha sido ampliamente utilizado en estudios previos y recientes, para determinar relaciones entre parámetros de estudio o para realizar predicciones sobre el parámetro de interés. En otro trabajo, mediante el uso de superficies de respuesta determinó el potencial de la especie vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) para eliminar del medio acuoso cinco productos farmacéuticos comúnmente recetados y de venta libre. En Pezzolla et al. (2021) aplicaron modelo de regresión lineal para

analizar la relación entre los parámetros químicos de la mezcla y la evolución de la temperatura durante el proceso del compost en residuos orgánicos.

Pezzolla et al. (2021) determinaron la selección de parámetros para la evaluación de la calidad del compost aplicando Modelos Lineales Generalizados (MLG) considerando los valores de temperatura de las mezclas, adicionalmente, aplicaron modelos de regresión no lineales para detectar diferencias entre las mezclas durante el proceso de compost, utilizando pulpa de desechos, aguas residuales de la producción de frituras, estiércol de pollo y cáscara de arroz.

Alba, Godoy, y Sixto (2006) utilizaron regresión para analizar la relación estadística que existe entre datos de producción y su incremento en el tiempo, al buscar estandarizar enmiendas orgánicas para banano.

Civeira y Lavado (2006), analizaron la relación entre el contenido de agua con la densidad aparente y el IEC, la porosidad total con el contenido de agua, al analizar el aporte de enmiendas orgánicas sobre propiedades físicas e hidrológicas de un suelo urbano degradado.

Zérega, Hernández, y Valladares en 1995 ya habían realizado una aplicación de regresión al analizar el efecto de 3 enmiendas sobre un suelo salino-sódico con 9 variedades de caña de azúcar.

## 2 Materiales y Métodos

El ensayo se realizó entre los años 2009 y 2010, en el ingenio “La Troncal” en la provincia del Guayas-Ecuador. Se probaron tres combinaciones de residuos industriales (tabla 1).

**Tabla 1:** Porcentaje de residuos probados en cada Formulación

| Fórmula | Bagazo | Cachaza | Ceniza |
|---------|--------|---------|--------|
| F1      | 25,0 % | 50,0 %  | 25,0 % |
| F2      | 40,0 % | 30,0 %  | 30,0 % |
| F3      | 50,0 % | 25,0 %  | 25,0 % |

**Fuente:** Elaboración propia

A través de análisis físicos, se estableció el contenido de humedad, materia orgánica (MO) y de ceniza de cada uno de los materiales utilizados en las formulaciones (tabla 2).

Otros factores analizados fueron las fuentes de microorganismos y el método de aireación. Se estableció un diseño experimental de tres factores: Formulación o combinaciones de residuos (ver tabla 1), Fuente de microorganismos, y Tipo de aireación. Para el factor microorganismo se tuvieron tres niveles, siendo: a) Sin microorganismos, b) con microorganismos comerciales, y c) con microorganismos locales. Para el factor tipo de aireación se tuvieron 2 niveles, siendo: a) utilizando

**Tabla 2:** Composición física de los ingredientes utilizados en las formulaciones probadas

|         | Bagazo  | Cachaza | Ceniza  |
|---------|---------|---------|---------|
| Humedad | 46,54 % | 86,75 % | 53,90 % |
| Cenizas | 4,48 %  | 2,74 %  | 40,14 % |
| MO      | 48,99 % | 10,51 % | 5,58 %  |

Fuente: Elaboración propia

tubo y b) por volteo. Se colocaron tres pilas de compost por cada tratamiento; las que tuvieron una medida de ocho metros de largo por 2,5 metros de ancho y 1,5 metros de altura inicial. Los microorganismos comerciales se aplicaron según recomendación del fabricante (4,5 g/t); los microorganismos locales se aplicaron según la dosis normalmente usada por el agricultor (1 l/kg), el cuál fue directamente suministrado a la pila de compost. Las variables de respuesta fueron la relación Carbono Nitrógeno (C/N) del compost obtenido y el contenido de materia orgánica (%MO) en el compost al final del proceso. (INN-Chile, 2004). A continuación, se describen las variables descriptoras utilizadas.

Variabes aleatorias tipo categóricas:

MicroOrg: compost sin microorganismos, con Microorganismos locales (MicroOrgL) y con microorganismos comerciales (MicroOrgC). Aireac: tipo de aireación, por tubo o por volteo.

Variabes aleatorias cuantitativas:

F %Hum: Porcentaje de Humedad en la fórmula. F %Cenizas: Porcentaje de Cenizas en la fórmula. F %MO: Porcentaje de materia orgánica en la fórmula. Altura: altura de la pila del compost. pH: promedio del nivel de acidez del compost. Temp: temperatura promedio de la pila de compost. O(cromat): contenido promedio de oxígeno en el compost, obtenido mediante el método de cromatografía de papel de Pfeifer. MO(cromat): contenido promedio de materia orgánica en el compost, analizado mediante el método de cromatografía de papel de Pfeifer. Conduct: promedio de la conductividad en el compost.

Las variables de tipo categórica fueron incluidas al modelo a través de variables Dummy.

Los parámetros de calidad más importantes y sus valores deseados al final del proceso, son los indicados por la Norma Chilena NCH-2880, la cual indica según las características del compost si es del tipo A, B o no apto.

### **Regresión avanzada**

Se aplicó el método estadístico-matemático de Regresión para modelar la relación entre la variable dependiente  $(Y = \frac{C}{N})$  y las variables independientes o predictoras  $(X_i)$  antes descritas, considerándose la presencia de posibles perturbaciones  $\epsilon$ .

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + \dots + \beta_p X_p + \epsilon$$

Se utilizó éste método debido a las ventajas que ofrece, tales como, estimar la cantidad de variabilidad o incertidumbre alrededor de la ecuación obtenida; predecir razonablemente valores de la variable dependiente, dado ciertos valores de las variables independientes; y estimar el grado de relación entre ellas (Zurita, 2008).

Se aplicó regresión avanzada, para seleccionar del conjunto de variables predictoras a las que se incluirán en el modelo final, a través del método stepwise, de eliminación posterior (backward), el cual empieza con el modelo base, el cual incluye todas las variables predictoras, y luego se eliminan una a una aquellas que no tengan un aporte significativo en el mismo; la eliminación depende básicamente de una secuencia de prueba F, si el nuevo modelo tiene diferencias estadísticas significativas con el anterior se decide la exclusión de la variable en el modelo final, para ello se utilizan las sumas cuadráticas de los errores dividido para sus grados de libertad (Agresti, 2018).

Para analizar el modelo seleccionado se realizaron las pruebas relacionadas de: a) normalidad e independencia o autocorrelación de los residuos, a través del test de Shapiro-Wilks y el estadístico de Durbin-Watson respectivamente (Miller y Rao, 2008); b) multicolinealidad de las variables descriptoras, utilizando la matriz de correlación; c) detectar out-layers entre las observaciones utilizando el estadístico de Leverage e influyentes (Miller y Rao, 2008) a través del DFITS (different in fit).

Para realizar el análisis de sensibilidad del modelo, se aplicó el método de Montecarlo, y determinar con ello que variable(s) podría(n) incrementar ampliamente el error de estimación, dados mínimos distanciamientos de sus valores con respecto a su promedio (Congdon, 2014).

Los datos fueron pre-procesados con Excel 2007. La simulación para la aplicación del método de Montecarlo fue realizada utilizando aplicaciones de Visual Basic en Excel. Los análisis estadísticos se los realizaron con Statgraphics Centurion XV Minitab 14 y R.

### 3 Resultados y Discusión

A continuación, se presenta el modelo obtenido para estimar la relación Carbono Nitrógeno  $\frac{C}{N}$  al final del proceso.

$$C/N = -10566.1 + 66.5738 \cdot \text{Altura} - 0.19824 \cdot \text{Altura}^2 - 1.8069 \cdot \text{Altura} \cdot \text{MOCromat} - 0.4597 \cdot \text{Altura} \cdot \text{Temp} - 0.2226 \cdot \text{Conduct} + 0.0015 \cdot \text{Conduct} \cdot F \% \text{Cenizas} + 0.0039 \cdot \text{Conduct} \cdot \text{Temp} - 18.411 \cdot F \% \text{MO} + 0.3609 \cdot F \% \text{MO} \cdot \text{Temp} + 32.0059 \cdot \text{MicroOrgC} + 188.788 \cdot \text{MOCromat} + 299.196 \cdot \text{Temp} - 2.7438 \cdot \text{Temp}^2 + 27.0893 \cdot \text{pH} - 90.2597 \cdot \text{Aireac} + \epsilon.$$

Los parámetros considerados son los que obtuvieron un valor p menor al nivel de significancia = 0.1 en sus respectivas pruebas t. Las variables no presentes, se excluyeron del modelo por ser poco significativo su aporte en la variable de respuesta. Éste modelo tiene una potencia de explicación R<sup>2</sup> de 99.5 % y R<sup>2</sup> Ajustado de 95.87 %; por tanto, el modelo se ajusta bastante bien a la variabilidad de los datos.

En el análisis de varianza para el modelo, se obtuvo un valor  $p$  de 0.0358; la suma cuadrática de los residuos fue de 5.2519 y la suma cuadrática del modelo fue 1077.17. El error estándar de la estimación fue 1.6205. La prueba de Shapiro-Wilks indica la existencia de la normalidad de los residuos (valor  $p = 0.0981$ ); la prueba K-S indica que existe evidencia estadística (valor  $p = 0.0849$ ) para afirmar que los errores se ajustan a una distribución  $N(0, 1.6)$  con nivel de significancia del 5 %.

El estadístico de Durbin-Watson confirma la autocorrelación entre los residuos (valor  $p = 0.1889$ ), por tanto, fue necesaria la aplicación de la transformación Cochrane - Orcutt que dio como resultado una autocorrelación = 0.00.

La Matriz de correlación entre las variables predictoras asegura la ausencia de multicolinealidad. Dado que cada elemento de la formulación probada está compuesto por humedad, ceniza y materia orgánica, humedad es una combinación lineal de las otras por lo que no aparece en el modelo.

Se detectó que el 45 % de las observaciones son consideradas como atípicas, ya que sus valores del estadístico de Leverage superan el valor crítico (0.8889) y 55 % de las observaciones pueden ser consideradas influyentes dado que el  $DFITS_{\text{tgl}/2} = 2.10$ , por tal motivo las estimaciones cambiarían mucho al no incluirlas en el modelo. Los valores anteriormente detallados indican la bondad del modelo y lo bueno que es como modelo explicativo y predictivo, sobre todo, válido para determinar las relaciones existentes entre las variables explicativas y la de respuesta, de esta manera podemos describir las siguientes:

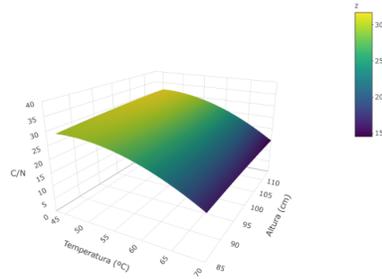
- Altura: dado el valor absoluto de su coeficiente, su aporte es muy representativo; tiene un efecto incremental en la relación C/N (coeficiente con signo positivo); y el pequeño valor negativo del coeficiente para la Altura<sup>2</sup>, vemos que a medida que disminuye la altura va de a poco incrementando su efecto sobre la relación C/N.
- Conductividad, por el valor absoluto del coeficiente, su aporte parecería pequeño, pero al multiplicar por los altos valores que toma este parámetro, su aporte se incrementa significativamente; existe una relación inversamente proporcional (coeficiente signo negativo) en la relación C/N, lo que implica que al tener mayor conductividad se reduce el C/N.
- Porcentaje de MO en la fórmula (F %MO), por el valor absoluto del coeficiente, su aporte es importante; existe una relación inversamente proporcional (coeficiente signo negativo) en la relación C/N, esto indica que si se aumenta la MO se reduce el C/N, en estudios similares como el realizado por Peña et al.(2020) se ha evidenciado que las diferencias significativas mostradas para diversos valores de temperatura no solo se debe al tipo de material utilizado, si no que también es originado por el %MO.
- Microorganismos Comerciales (MicroOrgC), su presencia en el compost hace que se incremente la relación C/N.
- MO detectada por el análisis cromatográfico (MOCromat), tiene alto valor positivo, lo que indica que existe un fuerte efecto directamente proporcional a la relación C/N.
- Temperatura, por el valor absoluto de su coeficiente su aporte es muy representativo; tiene un efecto incremental en la relación C/N (coeficiente con signo posi-

tivo), concordando con lo mencionado por Pezzolla et al. (2021) que obtuvieron una correlación positiva entre la temperatura durante la fase activa y soluble del N en las mezclas iniciales; dado el pequeño valor negativo del coeficiente para la Temperatura<sup>2</sup>, vemos que a medida que se incrementa la altura va poco a poco reduciendo su efecto sobre la relación C/N, sin embargo, cuando sobrepasa los valores de 50°C su efecto es decremental.

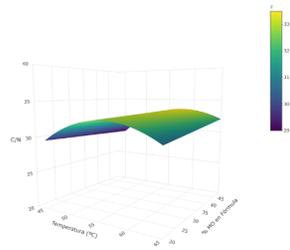
- pH, tiene valor positivo, lo que indica que tienen efecto directamente proporcional a la relación C/N.
- Aireación a través del volteo, su presencia en el modelo indica que en el compost disminuya el valor de la relación C/N.

A continuación, se analizan las interacciones presentes en el modelo obtenido. Los valores estimados de la relación C/N, fueron desplazados por una constante  $k_1$  para hacerlos positivos y multiplicados por una constante  $k_2$  para que las estimaciones queden en un rango [0, 40] de forma que sean fácil de interpretar. Por tanto, es importante aclarar que, dadas las transformaciones realizadas, los gráficos sirven para la interpretación de las interacciones mas no representan estimaciones de la variable de respuesta.

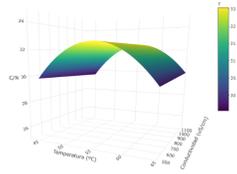
- Temperatura y Altura tienen correlación negativa no significativa ( $r = -0.23$ , valor  $p = 0.37$ ). Se puede observar en la figura 1a) que para valores de temperatura menor a 55°C, una disminución de la altura de la pila reduce un poco los altos valores de la relación C/N; mientras que para valores de temperatura mayores de 65°C, el decremento de la altura reduce el decremento de la relación C/N.
- Valores superiores a 50 % de MO en la fórmula del compost y valores de temperatura menores a 50°C decremanta la relación C/N; a medida que la temperatura se acerca a los 55°C el efecto del porcentaje de MO es menos perceptible, y es la temperatura quien incrementa o decremanta el resultado de la relación C/N; al superar los 60°C la disminución de MO en la fórmula potencia la disminución de la relación C/N, del mismo modo, Pezzolla et al. (2021) encontraron que la evolución de la temperatura combinada con MO %, fue favorable a la descomposición sostenida de la materia orgánica total.
- En cuanto a la interacción de la temperatura y la conductividad, la segunda ejerce un efecto similar al del porcentaje de MO en la fórmula, pero en menor incidencia, haciendo que la temperatura sea quien más afecte el resultado de la relación C/N.
- Tal como la indica la figura 1d), la altura tiene mayor incidencia en la relación C/N al analizar su interacción con el porcentaje de MO y éste tiene un efecto muy importante para valores menores de 100cm de altura. Al colocar 50 % o más de MO y tener por debajo de 100cm la pila del compost, hace que se incremente considerablemente la relación C/N; si se mantiene el porcentaje de MO y se tienen valores superiores a 100cm de altura de la pila, esto produce una disminución importante de la relación C/N. Considerando la variabilidad de la altura, valores menores de 40 % de MO tiene un comportamiento similar al de los valores superiores a 50 %, pero su efecto sobre la relación C/N es menos drástico, es decir, no incrementa o disminuye en demasía el resultado de la relación C/N.



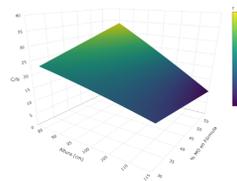
(a)



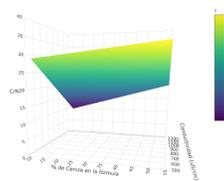
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 1:** Interacciones obtenidas en el modelo  
**Fuente:** Creación propia

**Figura 1(a):** Análisis de la interacción altura y temperatura del compost y su influencia en la relación C/N.

**Figura 1(b):** Análisis de la interacción porcentaje de MO y temperatura del compost y su influencia en la relación C/N.

**Figura 1(c)** Análisis de la interacción conductividad y temperatura del compost y su influencia en la relación C/N.

**Figura 1(d)** Análisis de la interacción porcentaje de MO y altura del compost y su influencia en la relación C/N.

**Figura 1(e):** Análisis de la interacción porcentaje de ceniza y conductividad del compost y su influencia en la relación C/N.

- El incremento del porcentaje de ceniza en la fórmula hace que se incremente la relación C/N y la disminución de la conductividad potencia este efecto; valores menores de 25 % de ceniza y superiores a 1000 de conductividad dan bajos valores de la relación C/N; mientras que valores mayores a 40 % de ceniza y conductividad menor a 750 incrementa la relación C/N.

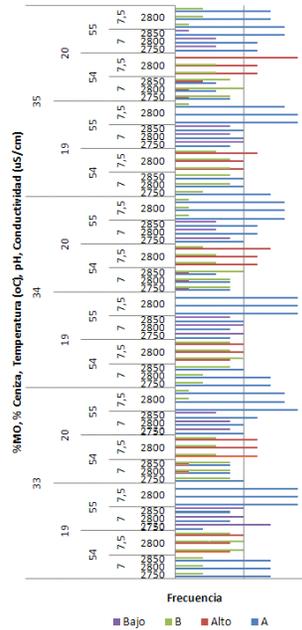
El análisis de sensibilidad del modelo indica que la temperatura es el parámetro más sensible, usualmente la temperatura es un parámetro que establece el fin del proceso de compostaje (de Mendonça Costa et al., 2017; Morales et al., 2016; Zhang y Sun, 2016); al iniciar el proceso con menos de 45°C o más de 55°C, incrementa la probabilidad de obtener al final valores extremadamente bajos de la relación C/N; esto podría producir que se realizara antes la mineralización del Nitrógeno.

Al incrementar los porcentajes de MO y Ceniza en la formulación, existe mayor probabilidad de obtener valores superiores a 50 de la relación C/N, el incremento de la conductividad hace que el aumento del porcentaje de ceniza potencia este efecto en la relación C/N; además, éste efecto se incrementa con valores de pH iguales o superiores a 7 o al incrementar la temperatura a 54°C o más; todo esto puede dar como resultado un período más largo de inmovilización neta.

Por otro lado, la figura 2 muestra que las probabilidades de obtener compost Clase A (20 C/N 25; Conductividad  $\leq 3000 \mu\text{S/cm}$ ) o clase B (25 C/N 35; Conductividad  $\leq 3000 \mu\text{S/cm}$ ), son mayores cuando se tiene al inicio del proceso una altura entre 100 y 102 cm, con pH preferiblemente 7.5 o que no baje de 7, temperatura entre 54°C y 55°C, que la conductividad se mantenga entre 2750  $\mu\text{S/cm}$  y 2850  $\mu\text{S/cm}$ ; la fórmula contenga entre 33 y 35 % de MO, 19 % o 20 % de Ceniza, completando el 100 % con Humedad; además se debe aplicar microorganismos comerciales y como tipo de aireación el volteo.

Las correlaciones significativas entre el porcentaje de MO en la fórmula inicial y la conductividad ( $r = 0.61$ , p-valor = 0.01), entre conductividad y pH ( $r = -0.77$ , p-valor = 0.0002), y entre pH y porcentaje de MO ( $r = -0.48$ , p-valor = 0.04), implica que si se incrementa la MO en la fórmula, se reduce el pH y se incrementa la conductividad. Dado que al final del proceso la relación C/N tiene correlación significativa y positiva con el contenido de MO, y tiene correlación significativa y negativa con el contenido de Nitrógeno del compost, se pueden explicar ambos parámetros en función de los valores que tome la primera, es así, que el modelo al estimar la relación

C/N, indirectamente ofrece información importante sobre los valores que tomarán los parámetros MO y N.



**Figura 2:** Presenta la frecuencia relativa del tipo de compost obtenido (clase A, clase B, con muy baja o muy alta relación C/N), aplicando el método de Montecarlo al modelo, analizando los posibles valores de MO, Ceniza, temperatura, pH, y conductividad; la altura no aparece aunque también fue analizada.  
**Fuente:**Elaboración propia

Por la correlación existente entre C/N y MO (ver figura 3), el tener un compost con relación C/N entre 20 y 30, nos asegura que al final del proceso se tendrá entre 15 % y 25 % de MO.

Llevando los valores de MO, Cenizas y Humedad a los valores de Bagazo, Cachaza y Ceniza disponibles en la empresa, se observa que no hay combinación alguna que dé el resultado esperado ya que el contenido de humedad en los componentes es muy alto, de manera especial en cachaza; la figura 4 muestra lo recomendado por Gordillo y Chávez (2010), se observa un incremento de 10 % aproximadamente en Humedad con una reducción de 5 % en Cenizas y 5 % en MO.

|            | Correlación | Valor p |
|------------|-------------|---------|
| MO(%)      | 0,48        | 0,04    |
| Humedad(%) | -0,09       | 0,72    |
| N          | -0,79       | 0,00    |
| P          | -0,36       | 0,14    |
| K          | 0,07        | 0,78    |
| C          | -0,22       | 0,37    |
| Mg         | -0,19       | 0,46    |
| Mn         | -0,40       | 0,10    |
| Cu         | -0,42       | 0,08    |
| Fe         | -0,21       | 0,41    |
| Z          | -0,29       | 0,24    |

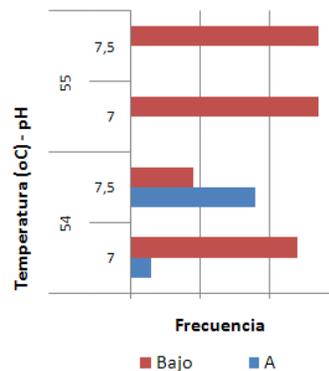
**Figura 3:** Correlación lineal de Pearson entre C/N y demás parámetros de calidad del Compost en su fase final

**Fuente:**Elaboración propia

|              | % en Fórmula  | Humedad      | Cenizas      | MO           |
|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| BAGAZO       | 50,0%         | 23,3%        | 2,2%         | 24,5%        |
| CACHAZA      | 25,0%         | 21,7%        | 0,7%         | 2,6%         |
| CENIZA       | 25,0%         | 13,5%        | 10,0%        | 1,4%         |
| <b>Total</b> | <b>100,0%</b> | <b>58,4%</b> | <b>13,0%</b> | <b>28,5%</b> |

**Figura 4:** Análisis del contenido de humedad, ceniza y materia orgánica, dado los porcentajes de bagazo, cachaza y ceniza en la fórmula inicial

**Fuente:**Elaboración propia



**Figura 5:** Presenta la frecuencia relativa del tipo de compost obtenido (clase A o con relación C/N muy baja), utilizando el modelo; fijando los valores de MO en 28.5 %, Humedad = 58.5 %, ceniza = 13 %, y analizando según los valores de temperatura, pH, altura y conductividad sugeridos, siendo temperatura y pH los que inciden en el resultado.

**Fuente:**Elaboración propia

Fijando los valores sugeridos por Gordillo y Chávez (2010), y considerando los rangos de valores sugeridos anteriormente para las demás variables descriptoras, el modelo obtenido indica que la probabilidad de obtener compost clase A con esta receta es de 0.195; sin embargo, al controlar la temperatura y pH en 54°C y 7.5 respectivamente, la probabilidad se incrementa a 0.667.

## 4 Conclusiones

El modelo obtenido resultó ser un buen modelo explicativo, para analizar las variables independientes versus la variable que mide la calidad del compost; y predictivo para estimar los posibles valores que tome la relación C/N en función de los valores iniciales que tomen las variables independientes.

El parámetro temperatura es el más crítico al momento de preparar el compost, dado que la producción del compost es un proceso dinámico, se debe poner mucho interés en su control, de tal manera que se mantengan los valores adecuados durante el desarrollo del proceso. De igual manera que al pH y la conductividad. La probabilidad de obtener compost clase A es superior cuando se coloca entre 33 % y 35 % de MO, 19 % de Ceniza y se completa el 100 % de la pila con Humedad; aplicando microorganismos comerciales; utilizando como método de aireación el volteo; y teniendo al inicio del proceso la conductividad en valores entre 2750 y 2850  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; alrededor de 55°C de temperatura y 7.5 de pH.

Dado los altos valores de humedad en los desechos industriales utilizados en La Troncal, la probabilidad de obtener un compost clase A se reduce considerablemente. Al mezclar 50 % de bagazo, 25 % de ceniza y 25 % de cachaza, se debe controlar de manera especial temperatura (54°C) y pH (7.5) en la pila inicial, y los demás parámetros mantenerlos en los valores sugeridos, de esta manera la probabilidad de obtener compost clase A se incrementa. Otra opción es reducir el nivel de humedad en los desechos, sobre todo de la cachaza y ceniza, de esa manera podrían tenerse los valores de materia orgánica ceniza y humedad ideales para que la probabilidad de obtener compost clase A sea aún mayor.

El propósito de esta investigación es mostrar el método estadístico multivariante de regresión para valorar diferentes mezclas de materias primas e identificar cómo afectan éstas a cada uno de los parámetros de calidad del compost como producto final. Dado los resultados es posible replicar este trabajo con datos actualizados que corroboren las conclusiones aquí presentadas.

## 5 Bibliografía

### Referencias

- Agresti, A. (2018). *An introduction to categorical data analysis*. John Wiley & Sons.
- Alba, N., Godoy, N., y Sixto, H. (2006). Growth and potential production of different populus alba l. clones for biomass. En *15th european biomass conference and exhibition. berlin* (pp. 728–729).
- Civeira, G., y Lavado, R. S. (2006). Efecto del aporte de enmiendas orgánicas sobre propiedades físicas e hidrológicas de un suelo urbano degradado. *Ciencia del suelo*, 24(2), 123–130.
- Congdon, P. (2014). *Applied bayesian modelling*. John Wiley & Sons.
- de Mendonça Costa, M. S. S., Bernardi, F. H., de Mendonça Costa, L. A., Pereira, D. C., Lorin, H. E. F., Rozatti, M. A. T., y Carneiro, L. J. (2017). Composting as a cleaner strategy to broiler agro-industrial wastes: Selecting carbon source to optimize the process and improve the quality of the final compost. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2084–2092.
- Gordillo, F., y Chávez, E. (2010). Evaluación comparativa de la calidad del compost producido a partir de diferentes combinaciones de desechos agroindustriales azucareros.
- Miller, J. P., y Rao, D. (2008). *Epidemiology and medical statistics. handbook of statistics, volume 27*. Elsevier Science & Technology.
- Morales, A. B., Bustamante, M. A., Marhuenda-Egea, F. C., Moral, R., Ros, M., y Pascual, J. A. (2016). Agri-food sludge management using different co-composting strategies: study of the added value of the composts obtained. *Journal of cleaner production*, 121, 186–197.
- Pezzolla, D., Cucina, M., Proietti, P., Calisti, R., Regni, L., y Gigliotti, G. (2021). The use of new parameters to optimize the composting process of different organic wastes. *Agronomy*, 11(10), 2090.
- Zérega, L., Hernández, T., y Valladares, J. (1995). Efecto de 3 enmiendas sobre un suelo salino-sódico con 9 variedades de caña de azúcar. *Caña de Azúcar*, 13, 51–64.
- Zhang, L., y Sun, X. (2016). Influence of bulking agents on physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage composting of green waste.

*Waste Management*, 48, 115–126.

Zurita, G. (2008). *Probabilidad y estadística, fundamentos y aplicaciones, ediciones del instituto de ciencias matemáticas espol, guayaquil, ecuador.*