

# Estimación del volumen de un Biodigestor tipo balón usando redes neuronales artificiales

## Estimate of the kind-ball biodigester's volume using artificial neural networks

Recibido: 18-11-2015 Aceptado: 29-04-2016

Victor Hugo Tabarquino Muñoz<sup>2</sup>  
Luis Octavio González Salcedo<sup>3</sup>  
Adrian Luis Ernesto Will<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Artículo producto del Proyecto "Estimación de Parámetros de Diseño de un Biodigestor Tipo Balón usando Redes Neuronales Artificiales". Trabajo de Grado (Ingeniero Agrícola), Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Agosto – Diciembre 2014, Palmira.

<sup>2</sup> Colombiano, Ingeniero Agrícola, Grupo de Energías Alternativas y Ahorro Energético – GEAL, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira – Colombia.

<sup>3</sup> Colombiano, Dr. Ingeniería de Materiales, Profesor Asociado, Grupo de Energías Alternativas y Ahorro Energético – GEAL, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira – Colombia. <sup>4</sup>Autor de correspondencia: logonzalezsa@unal.edu.co.

<sup>4</sup> Argentino, Dr. Matemáticas, Profesor Adjunto, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, y Grupo de Investigación en Tecnologías Informáticas Avanzadas – GITIA, Tucumán – Argentina.

### Resumen

La biomasa como fuente alterna de energía puede ser convertida en biogás producido a partir de la digestión anaeróbica de materia orgánica. Para tal fin se usa un compartimiento denominado biodigestor, y diversos protocolos se han definido para la estimación de su volumen y del biogás obtenido, usando una combinación de tablas para el origen de la fuente de la biomasa, ecuaciones que involucran variables como la temperatura ambiente, la carga de la masa biológica y el tiempo de retención. El tratamiento de residuos de materia orgánica y la sistematización de dicha actividad en granjas pecuarias, requiere la intervención de expertos o la utilización de sistemas inteligentes que permitan involucrar variables tanto cualitativas como cuantitativas. En el presente trabajo se estima el volumen de un biodigestor tipo balón, usando redes neuronales artificiales (RNA), las cuales son entrenadas para condiciones generales de generación de residuos por actividades pecuarias y agrícolas. Para evaluar la confiabilidad en la estimación, se usó como indicador de desempeño de la RNA el factor de correlación R. Los resultados muestran que la estimación usando la técnica elaborada es confiable y puede ser usada de manera generalizada.

**Palabras Clave:** energías alternativas; biomasa; biodigestor; inteligencia artificial; redes neuronales artificiales.

### Abstract

Biomass, as an alternative source of energy, can be converted into biogas through the anaerobic digestion of organic material. The device used for this purpose is called biodigester, and several protocols have been studied aimed at estimating the volume and quantity of the gas obtained. These protocols use a combination of the origin

of the biomass and equations involving environment temperature, biological load and retention time. The treatment of organic residues and the systematization of the activity on livestock farms requires the intervention of expert users or the implementation of intelligent systems, which allow for quantitative and qualitative variables. In this paper, we use Artificial Neural Networks (ANN) to estimate the production volume of a bio-digester ball. The networks are designed for this use on both livestock and farming residues. The efficiency of the estimation is evaluated using R Correlation Coefficient. Results show that the technique is reliable and can be used in practice.

**Keywords:** alternative energy; biomass; bio-digester; artificial intelligence; artificial neural networks.

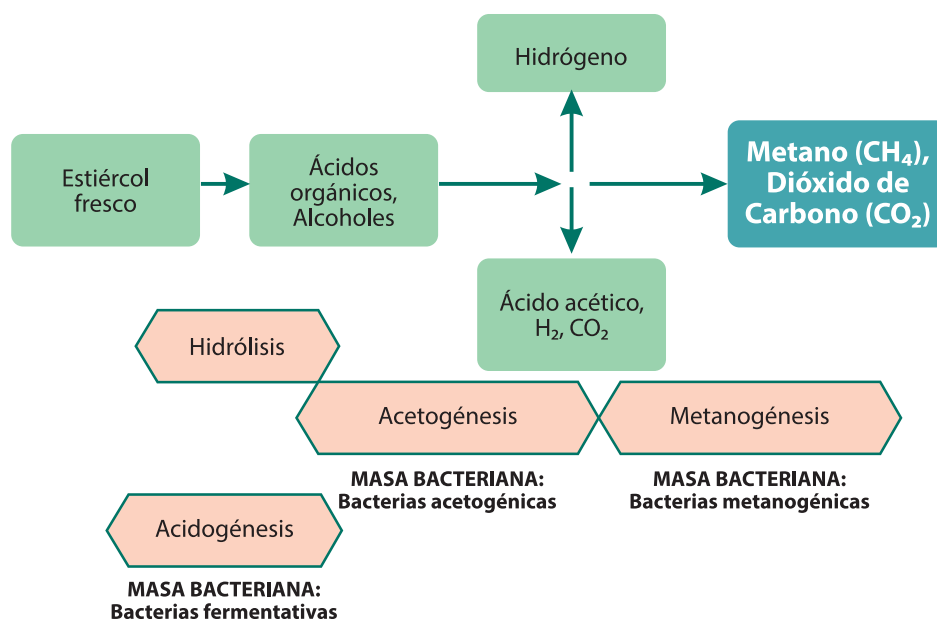
### Introducción

Las fuentes de energía alternas, renovables o blandas, en contraposición de las provenientes de los hidrocarburos, destacan a la energía solar, la energía eólica, la biomasa, la energía hidráulica, la energía maremotriz, entre otras (Correa, 2007). La biomasa, cantidad de productos obtenidos por fotosíntesis, es susceptible de ser transformada en combustible, y puede provenir de los residuos de actividades pecuarias y agrícolas (Rodríguez et al., 2013).

La actividad pecuaria produce residuos de materia orgánica, y cada especie pecuaria es una fuente de esta comúnmente conocida con el término de estiércol, e incluso las heces del hombre han sido consideradas como fuente energética (González, 2010). Por su parte, la actividad agrícola produce residuos, principalmente del tipo cáscaras de frutas, de semillas, hojas, y frutas en descomposición. Ambos residuos son llamados biomasa agrícola (González, 2010).

La biomasa agrícola se convierte en un combustible tradicional, el biogás, el cual corresponde a una mezcla de metano y otros gases producidos durante la degradación anaerobia de la materia orgánica, en un compartimiento digester o bien canalizándolo en un vertedero controlado (FAO, 2011). En el primer caso, denominado biodigestor, la temperatura es mantenida alrededor de 50 °C, un pH entre 6,2-8,0, favoreciendo las actividades de los microorganismos y la degradación bioquímica entre 10-25 días, para que en tres fases (acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) se realice la producción de biogás (FAO, 2011).

Diversos Autores citados por Olaya & González (2009, pp 8-10), consideran dentro del proceso una fase inicial a las mencionadas, denominada como hidrólisis; la figura 1 resume las distintas características de cada una de las diferentes etapas, agrupadas con sus respectivos compuestos químicos que en ellos intervienen (Martí, 2008, Olaya & González, 2009, p.10).



**Figura 1.** Síntesis de las etapas presentes en la digestión anaeróbica  
**Fuente:** (Martí, 2008; Olaya y González, 2009).

La instalación de biodigestores son también sistemas para el tratamiento de residuos de materia orgánica, los cuales son evitados sus vertimientos en las fuentes de agua, que a su vez generan un combustible, generalmente utilizado para calefacción de espacios y cocción de alimentos, y en los últimos años, como combustible en plantas utilitarias de generación eléctrica (González, 2011).

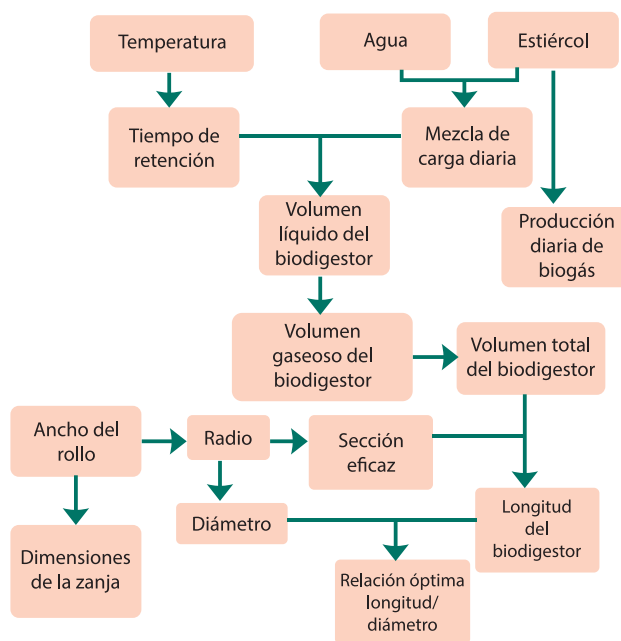
Los biodigestores son de tres tipos (Olaya & González, 2009): tubular o tipo balón, de cúpula fija, y de cúpula móvil; la instalación de los dos últimos es de mayor costo, en razón a que son construidos con elementos de mampostería o de hormigón, mientras que el de tipo balón (Figura 2), es elaborado a partir de láminas plásticas tubulares comercialmente disponibles, y se reportan casos exitosos de instalación por parte de la misma comunidad (Moncayo, 2008).



**Figura 2.** Biodigestor tipo balón o tubular  
Fuente: (González, 2010).

Cobra pertinencia entonces, la búsqueda de elementos y técnicas que permitan sistematizar el proceso de producción de biogás para potenciar el uso de este combustible, principalmente, en comunidades rurales. Sin embargo, los protocolos de diseño de los biodigestores combinan el uso de tablas que contienen las capacidades energéticas acordes al origen de la fuente de la biomasa, y ecuaciones para estimar el volumen del biodigestor y de biogás producido, involucrando variables cualitativas y cuantitativas en dicho proceso (Martí, 2008).

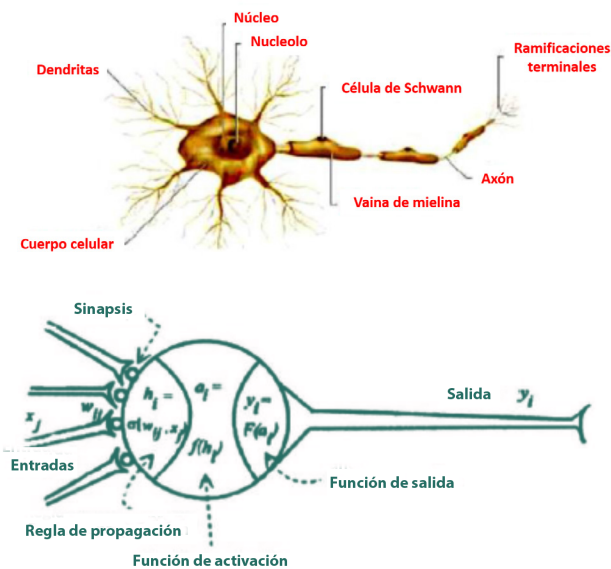
Al respecto, Martí (2008, p.31), basado en una fundamentación teórica, propone una metodología de diseño para estimar el volumen de biogás y del biodigestor tipo balón, válida para cualquier piso térmico, como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Propuesta metodológica para el diseño de biodigestores tipo balón  
Fuente: Martí, 2008, p.31

Por su parte, la inteligencia artificial, término acuñada en 1960 por Minsky, quien en su sentido más amplio indica la capacidad de un artefacto de realizar los mismos tipos de funciones que caracterizan el pensamiento humano, y en estos términos, sus métodos son una respuesta al deseo de aproximar el comportamiento y el pensamiento humano a diversos sistemas para la solución de determinadas problemáticas (Cagnina, 2010). Uno de estos métodos son las redes neuronales artificiales (RNA), abstracción funcional de la estructura neuronal biológica del sistema central nervioso (Figura 4), recreando desde la perspectiva biológica la estructura de un cerebro humano (Bishop, 2006).

Las RNA hoy en día son consideradas como poderosas reconocedoras y clasificadoras de patrones (Bishop, 2006), utilizadas en la solución (predicción) de problemas de ingeniería, como una alternativa en sistemas complejos caracterizados por factores de interacción, en sistemas de aproximaciones estadísticas no lineales, o en sistemas de solución computacional basados en algoritmos complejos y extensos (Haykin, 2005), que involucrarían variables cuantitativas y cualitativas, y que en estas últimas, relacionarlas en un modelo matemático se hace difícil.



**Figura 4.** Similitud entre una neurona biológica y una computacional, a partir de la comparación de las estructuras biológicas y computacionales, respectivamente  
**Fuente:** (Isasi, 2007; Bertona, 2005).

En su contexto histórico, las RNA se iniciaron como una red monocapa, denominada Perceptrón Simple que solo podía realizar soluciones de algunas funciones lógicas, como OR, AND y NOT, sin estimaciones numéricas. Posteriormente, su desarrollo permitió estimaciones numéricas, siendo conocida como red ADALINE. Hoy en día, muchos problemas en la ingeniería son abordados a partir de redes con diversas capas, y reciben el nombre de Perceptrón Multicapa, con un procedimiento supervisado de aprendizaje, es decir, se entrenan a partir del error de aproximación contra los verdaderos resultados (Bishop, 2006).

En el presente trabajo, se procede a la elaboración de una RNA Multicapa con entrenamiento supervisado y ajuste del error hacia atrás, entrenada para la estimación del volumen de un biodigestor tipo balón, para condiciones generales de temperatura ambiental y origen de la fuente de la biomasa.

## Procedimiento metodológico

### Construcción del conjunto de entrenamiento de la red neuronal artificial

Para el entrenamiento de la RNA se prepara una base de datos conformada por patrones o vectores de información, que le permitan al modelo de predicción hacer

el reconocimiento de las relaciones que existen entre las neuronas (variables) de entrada que conllevan al resultado de la neurona a predecir (variable de salida). Para tal fin, de acuerdo con el protocolo de diseño de biodigestores propuesto por Martí, (Figura 3), se hace una selección de variables de entrada relevantes en el problema de determinación del volumen de un biodigestor tipo balón.

Estas son las siguientes: origen de la fuente del residuo orgánico [OF], temperatura ambiente en °C [T], tiempo de retención de la materia orgánica dentro del biodigestor en días [t], carga de estiércol de acuerdo con la fuente en l/día [C], contenido de sólidos orgánicos del residuo orgánico en % [%SO], producción de biogás de acuerdo con el contenido de sólidos orgánicos en m<sup>3</sup>/kg de %SO [PBG], y perímetro tubular del plástico comercialmente disponible para la construcción del biodigestor en m [P]. Como variable de salida, se asocia a esta información para cada patrón el volumen del biodigestor tipo balón en m<sup>3</sup> [V].

La variable OF corresponde a una variable cualitativa, la cual es tratada como variable cuantitativa jerarquizada, procedimiento que consiste en convertir una variable simbólica o de valor discreto en una variable pseudo-discreta, y en el cual, a partir de un orden establecido de posición jerárquica de la respuesta de la variable discreta, se establecen sub-intervalos para cada neurona binaria, 0 a 1, como es descrito por March, 2001.

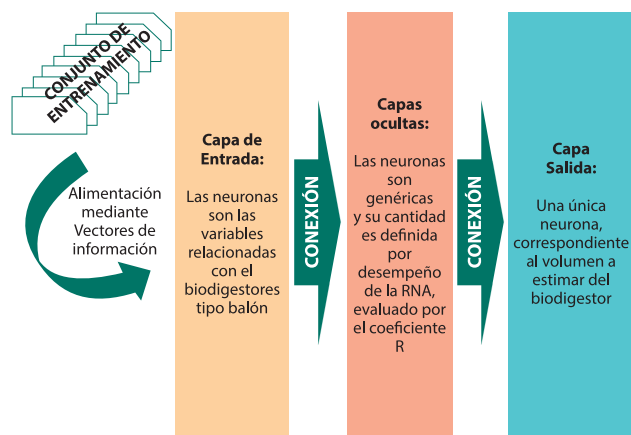
Posterior a la determinación de las variables de entrada y de salida, se realiza la elaboración de la base de datos general con el cual se determina el conjunto de entrenamiento, conformado por 90 vectores de información (variables de entrada y de salida), usando el protocolo de diseño de biodigestores tipo balón presentado por (Martí, 2008).

### Elaboración, entrenamiento, puesta en marcha, validación y selección de la red neuronal artificial para la estimación del volumen del biodigestor tipo balón

Se usa el conjunto de entrenamiento mencionado en la sección 2.1., en el cual se relacionan las variables de entrada con la variable de salida, se elabora una propuesta de RNA multicapa alimentada hacia adelante y con metodología de entrenamiento/aprendizaje hacia atrás (Figura 5), cuyas características son definidas por Rumelhart et al., 1986; Hinton 1987, 1988, respectivamente.

Las conexiones entre las neuronas de la capa de entrada a cada capa oculta, se hace usando la función sigmoidea descrita por Hinton, 1987, 1988; las conexiones entre las neuronas de la última capa oculta y la neurona a estimar ubicada en la capa de salida, se hace usando una función lineal, de tal forma que se permita la comparación de la estimación y del resultado verdadero, como es descrito en el entrenamiento supervisado (Rumelhart et al., 1986, y Hinton 1987, 1988).

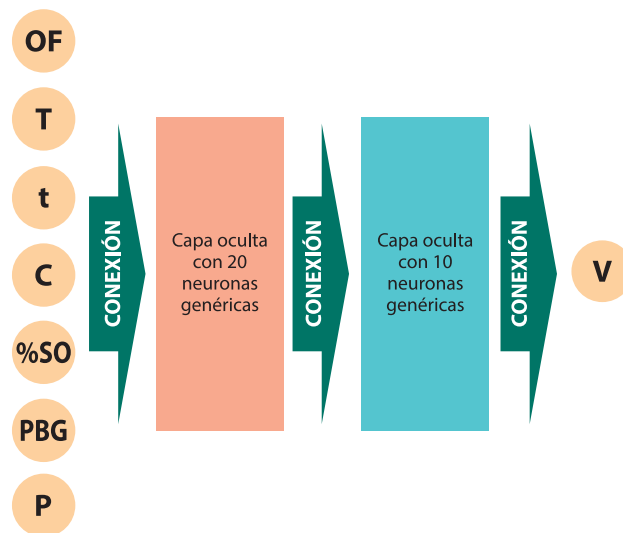
Para tal fin, Tabarquino, 2014, elaboró 82 conformaciones de RNA, y las evaluó a partir del factor de correlación lineal R; para su funcionamiento computacional, la RNA se codificó en un algoritmo usando el lenguaje de programación M, propio de la herramienta de software matemático MATLAB® para plataforma Windows®, el código usó la librería contenida en el Neural Networks Toolbox del mismo software, lo cual permitió implementar los modelos del tipo de RNA que se ha descrito.



**Figura 5.** Propuesta de modelo neuronal para la estimación del volumen de un biodigestor tipo balón  
**Fuente:** los autores.

Los resultados de este proceso, no presentado en este artículo, mostraron que arquitecturas con dos y tres capas ocultas, y usando métodos de aprendizaje de Levenberg-Marquardt, Gradiente Conjugado de Cuasi-Newton, Gradiente Conjugado Clásico, Gradiente Conjugado de Powell-Beale, Gradiente Conjugado de Fletcher-Powell, Gradiente Conjugado de Pollak-Ribiére, Secante de Paso Unitario, y Gradiente Descendiente de Tasa de Entrenamiento Variable, obtuvieron mejores, adecuados y confiables desempeños ( $R > 0,98$ ), que usando los métodos de Regulación Bayesiana, y Propagación Resiliente hacia Atrás. La arquitectura de la RNA se configura entonces con una capa de entrada con 7 variables de entrada, una primera capa oculta con 20 neuronas, una segunda capa oculta con 10 neuronas, una capa de salida con una variable

de respuesta y un algoritmo de aprendizaje hacia atrás de Levenberg-Marquardt (Figura 6).



**Figura 6.** Arquitectura y topología de la RNA seleccionada para la estimación del volumen de un biodigestor  
**Fuente:** los autores.

## Resultados y discusión

A partir de la elaboración de una RNA, correspondiente a un red neuronal supervisada Perceptrón Multicapa, con alimentación hacia adelante y entrenamiento/aprendizaje para la propagación del error hacia atrás, se realizó la estimación del volumen de un biodigestor tipo balón. El modelo neuronal consistió de una RNA conformada por una capa de entrada con 7 variables de entrada (de las cuales una es de tipo cualitativa con tratamiento a variable numérica jerarquizada), una primera capa oculta con 20 neuronas, una segunda capa oculta con 10 neuronas, una capa de salida con una variable de respuesta correspondiente a la estimación del volumen del biodigestor tipo balón, y algoritmo de aprendizaje de Levenberg-Marquardt.

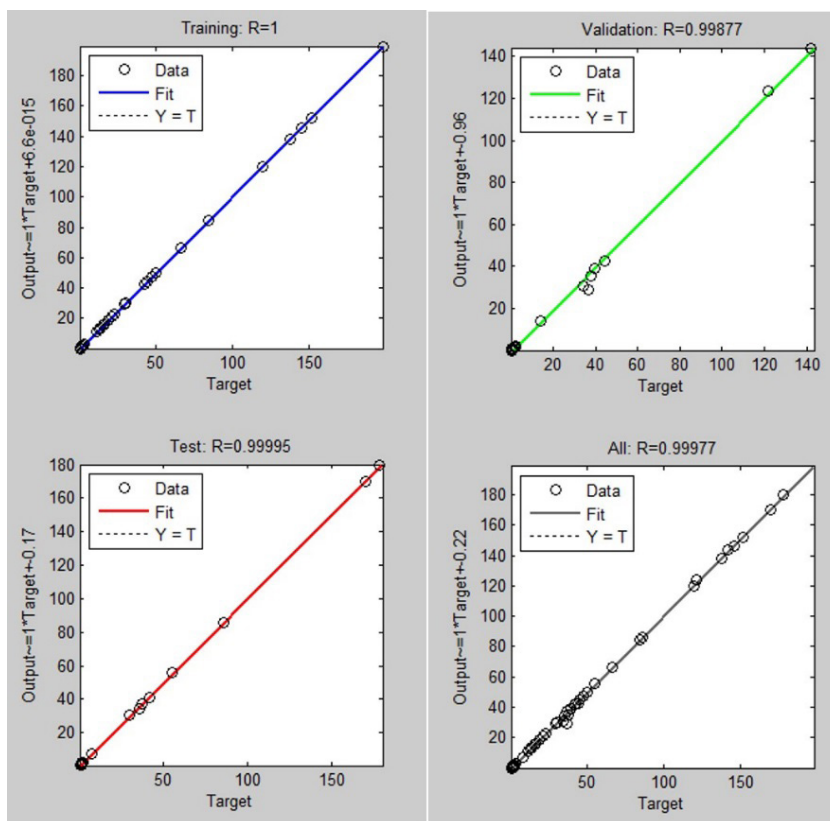
La Figura 7, muestra los resultados de desempeño de la RNA seleccionada, para cada una de las etapas de entrenamiento de la misma (entrenamiento, prueba, validación computacional, y con todo el conjunto de entrenamiento). Para todas las etapas, se hace una comparación entre el resultado obtenido por la RNA (output) y el valor obtenido usando el protocolo de diseño (target), para lo cual se asocia a dicha comparación el factor de correlación lineal R.

El desempeño se basó en el factor de correlación lineal R ( $R > 0,99$ ), de acuerdo con Ascombe, 1973, y Aschen, 1982, muestran una relación lineal positiva fuerte entre el valor del volumen del biodigestor obtenido, a partir

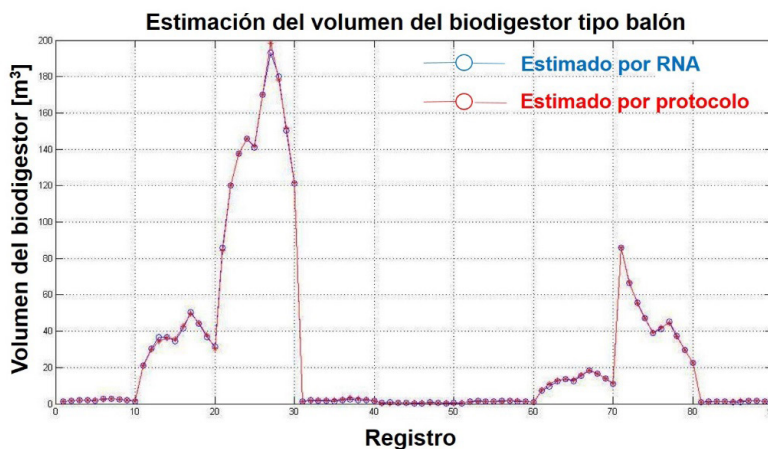
del protocolo de diseño propuesto por Martí, 2008, y el obtenido mediante la predicción de la RNA, lo cual permite inferir que la herramienta computacional es adecuada y confiable para hacer dichas estimaciones.

En la Figura 8, se representan simultáneamente los resultados estimados por la RNA, y los obtenidos por el protocolo de diseño de Martí, 2008, con el fin de verificar

la bondad en el ajuste de la predicción, a partir de la comparación gráfica entre los dos resultados, como es sugerido por Martínez (2005, p.22). La corroboración para cada registro en la aproximación del resultado obtenido por predicción, permite inferir que el modelo computación basado en la RNA puede ser usado como metodología de diseño de biodigestores tipo balón.



**Figura 7.** Resultados de desempeño de la RNA seleccionada para la estimación del volumen del biodigestor tipo balón  
**Fuente:** los autores



**Figura 8.** Comparación gráfica de los resultados entregados por la Red Neuronal Artificial y los obtenidos por protocolo de diseño  
**Fuente:** los autores

La literatura reporta el uso de RNA en el diseño de sistemas de aprovechamiento de energías alternativas, como solar (Gandolfo et al., 2011, González, 2013), eólica (López et al., 2007) e hidráulica (Villada et al., 2008); sin embargo, no se reportan aplicaciones similares en el diseño de biodigestores, razón por la cual la utilización de modelos neuronales artificiales en dicho campo es una aplicación novedosa.

## Conclusiones y recomendaciones

Una red neuronal artificial fue elaborada para la estimación del volumen de biogidestores tipo balón, la cual generaliza adecuadamente los resultados que se obtienen en los protocolos convencionales de diseño. Los resultados obtenidos permiten trazar las siguientes conclusiones y recomendaciones para futuras agendas:

El indicador de desempeño considerado, el factor de correlación lineal, muestra que la red neuronal artificial es confiable para la estimación del volumen del biodigestor, acorde a los resultados que se obtendrían con los métodos convencionales de diseño.

La consideración en el modelo neuronal de variables que representan la fuente de origen del residuo de la materia orgánica, y variabilidad en los factores influyentes como la temperatura ambiente y el tiempo de retención, permiten tener una herramienta de predicción universal del volumen de un biodigestor tipo balón.

La red neuronal artificial permite considerar entonces, una variable cualitativa, lo cual aventaja en este caso en particular, a otros modelos matemáticos para fines similares.

La red neuronal artificial puede potenciar su uso como herramienta computacional para procesos de sistematización en las actividades agropecuarias que generen residuos de materia orgánica encaminadas a la producción de biogás como combustible alternativo.

La posibilidad de controlar las variables de entrada, permite hacer ajustes a las mismas, de acuerdo con dinámicas propias de la generación de residuos, mediante nuevos entrenamientos y aprendizajes de la propia red neuronal artificial.

Se abre una agenda futura de investigación, al extender el modelo neuronal para el diseño de otros tipos de biodigestores, y la utilización de la biomasa como fuente alterna de energía para la producción de biogás.

## Referencias

- Achen, C.H. (1982). *Interpreting and Using Regression*. Series/Number 07-029, Sage University Paper. Sage Publications, Newbury Park (CA). 89p. ISBN: 0-8039-1915-8.
- Ascombe, T.W. (1973). Graphs in Statistical Analysis. *The American Statistician*, (27): 17-21.
- Bertona, L.F. (2005). *Entrenamiento de Redes Neuronales basado en Algoritmos Evolutivos*. Tesis (Ingeniería Informática). Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Buenos Aires, 256p.
- Bishop, C.M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, Singapore, 803p. ISBN: 978-0387-31073-2.
- Cagnina, L.C. (2010). Un nuevo paradigma Computacional basado en una antigua investigación biológica. *Fundamentos en Humanidades*, 11 (1:21): 133-150.
- Correa H., N. (2007). *Fuentes Alternas de Energía*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente. Medellín. 198p.
- FAO. (2011). Manual de Biogás. Proyecto CHI/00/32 Chile: *Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables*, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO. Santiago de Chile, 119p. ISBN: 978-95-306892-0.
- Gandolfo, D.C.; Molina, M.G.; Patiño, H.D. (2011). *Estimación de la energía generada por sistemas fotovoltaicos mediante redes neuronales artificiales*. Memorias del Cuarto Congreso Nacional y Tercer Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía – HYFUSEN 2011. Ponencia 11-075. Mar de Plata, Junio 6-11.
- González I., G.I. (2011). *Planificación y Evaluación Económica, Financiera y de Impacto Ambiental de la Instalación de un Biodigestor en un Criadero de Cerdos*. Trabajo Final (Ingeniero Agrónomo). Universidad Nacional de Río Cuarto,

- Facultad de Agronomía y Veterinaria. Río Cuarto, 78p.
- González R., A.F. (2013). *Modelo para la predicción de la radiación solar a partir de redes neuronales artificiales*. Trabajo de Grado (Ingeniero Mecatrónico), Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado, 80p.
- González S., L.O. (2010). *Lectura de Introducción a las Fuentes Alternas de Energía y su Aplicación en la Explotación Agropecuaria*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira, 27p.
- Haykin, S. (2005). *Neural Networks, a Comprehensive Foundation*. 2<sup>nd</sup> Edition. Pearson Prentice Hall, Delhi, 823p. ISBN: 81-7808-300-0.
- Hinton, G.E. (1987). *Connectionist Learning Procedures*. Technical Report CMU-CS-87-115. Computer Science Department, Carnegie-Mellon University, Pittsburg, 58p.
- Hinton, G.E. (1988). *Connectionist Learning Procedures*. *Artificial Intelligence*, 40 (1-3): 185-234.
- Isasi V., P. (2007). *Redes de Neuronas*. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Informática, Madrid, 59p.
- López A., P.; Velo S., R.; Maseda E., F. (2007). *Estimación de la velocidad del viento mediante redes neuronales*. Memorias del XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Lugo, Septiembre 26-28, 1083-1092.
- Martínez R., E. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, (38): 315-332.
- Minsky, M. (1960). *Steps toward Artificial Intelligence*. Department of Mathematics, Research Laboratory of Electronics, MIT, 65p.
- Moncayo R., G.; (2008). *Biodigestores: Dimensionamiento, Diseño y Construcción de Biodigestores y Plantas de Biogás*. AquaLimpia Beratende Ingenieure. Madrid, 750p. ISBN: 978-9942-01-719-2.
- Olaya A., y.; González S., L.O. (2009). *Fundamentos para el Diseño de Biodigestores*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira, 32p.
- Rodríguez S., J.; González S., L.O.; Rojas G., A.F.; Palacios P., J.A. (2013). *Energía y Ambiente*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira, 380p. ISBN: 978-958-761-596-8.
- Tabarquino M., V.H. (2014). *Estimación de parámetros de diseño de un biodigestor tipo balón usando redes neuronales artificiales*. Trabajo de Grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Facultad de Ingeniería y Administración, Palmira, 84p.
- Villada. F.; Cadavid, D.R.; Molina, J.D. (2008). Pronóstico del precio de la energía eléctrica usando redes neuronales artificiales. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, (44), junio: 111-118.