



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Análisis y comparación exérgica de plantas de potabilización de agua: estudios de caso río Cali y río Cauca**

**Liliana Rocío Beltrán Acevedo**

**Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Administración  
Palmira, Colombia  
Mayo de 2019**

# **Análisis y comparación exergética de plantas de potabilización de agua: estudios de caso río Cali y río Cauca**

**Liliana Rocío Beltrán Acevedo**

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial  
para optar al título de:  
Magíster en Ingeniería Ambiental

Director (a):

**Ph.D., Carlos Humberto Mora Bejarano**

Línea de Investigación:

Análisis exergoecológico de procesos energéticos

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Administración  
Palmira, Colombia  
Mayo de 2019

# CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN</b> .....	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>0. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>12</b>
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>15</b>
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	17
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
<b>4. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>18</b>
4.1. TERMODINÁMICA .....	18
4.2. EXERGÍA .....	18
4.2.1. Componentes de la exergía.....	20
4.2.2. Exergía Química.....	21
4.3. EXERGÍA EN LOS PROCESOS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA.....	22
4.3.1. Exergía de la materia inorgánica.....	23
4.3.2. Exergía de los insumos químicos.....	25
4.3.3. Exergía de los subproductos.....	25
4.4. EFICIENCIAS EXERGÉTICAS .....	27
4.5. EXERGÍA Y ECONOMÍA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
<b>5. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>30</b>
<b>6. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>39</b>
6.1. MATERIALES.....	39
6.1.1. Planta Río Cauca.....	39
6.1.2. Planta Río Cali.....	43
6.2. MÉTODOS.....	49
6.2.1. Fase I: Documentación del estudio.....	50
6.2.2. Fase II: Organizar los datos.....	51
6.2.3. Fase III: Cálculos de exergía.....	52
6.2.4. Fase IV: aplicación del análisis y comparación exergética de las plantas potabilizadoras .....	53
<b>7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>54</b>
7.1. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA DURANTE EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN .....	54

7.2. EVALUACIÓN DE EXERGÍA POR OPERACIÓN DENTRO DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN.....	61
7.3. ANÁLISIS EXERGÉTICO COMPARATIVO ENTRE LAS PLANTAS POTABILIZADORAS.....	64
<b>8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>75</b>
<b>9. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>77</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>79</b>
<b>10. ANEXOS.....</b>	<b>87</b>
10.1. ANEXO 1: MARCO LEGAL.....	87

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>TABLA 2.</b> CAUDAL DE AGUA DE ENTRADA, SALIDA Y PÉRDIDAS EN LAS PLANTAS RÍO CAUCA Y RÍO CALI ..	54
<b>TABLA 3.</b> PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS PROMEDIO DE LA PLANTA RÍO CAUCA .....	55
<b>TABLA 4.</b> PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS PROMEDIO DE LA PLANTA RÍO CALI.....	55
<b>TABLA 5.</b> ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS COT Y ARENA EN LOS FLUJOS DE ENTRADA SALIDA.....	56
<b>TABLA 6.</b> INSUMOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN LAS DOS PLANTAS DE POTABILIZACIÓN EN 2016.....	56
<b>TABLA 7.</b> FLUJOS DE EXERGÍA EN LAS CORRIENTES DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN EN LA PLANTA RÍO CAUCA.....	68
<b>TABLA 8.</b> FLUJOS DE EXERGÍA EN LAS CORRIENTES DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN EN LA PLANTA RÍO CALI. ....	73
<b>TABLA 9.</b> ÍNDICES DE DESEMPEÑO EXERGÉTICO DE LAS PLANTAS POTABILIZADORAS RÍO CAUCA Y RÍO CALI. ....	73

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>FIGURA 1.</b> SENSACIÓN DE INCONFORMIDAD Y TRANSFORMACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. ....	13
<b>FIGURA 2.</b> ESQUEMA CONCEPTUAL DEL PROBLEMA. ....	14
<b>FIGURA 3.</b> FASES DE LA INVESTIGACIÓN .....	50
<b>FIGURA 4.</b> CONCENTRACIÓN (MG/L) Y EXERGÍA DE CONTRIBUCIÓN (KJ/MOL) DE DIFERENTES SUSTANCIAS INORGÁNICAS, EN LAS DIFERENTES OPERACIONES DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA EN LAS PLANTAS RÍO CAUCA Y RÍO CALI.....	58
<b>FIGURA 5.</b> EXERGÍA QUÍMICA ESPECÍFICA EN LAS ETAPAS DE DOS PROCESOS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA .....	62
<b>FIGURA 6.</b> FLUJOS MÁSICOS Y VOLUMÉTRICOS EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA EN LA PLANTA RÍO CAUCA .....	65
<b>FIGURA 7.</b> FLUJOS MÁSICOS Y VOLUMÉTRICOS EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA EN LA PLANTA RÍO CALI.....	69

# RESUMEN

El análisis exergético es una herramienta útil en la reducción de los impactos ambientales debido a que permite identificar las ineficiencias en el proceso y presenta la opción de reducirlas. En Colombia no hay experiencias que se tienen respecto a los análisis exergéticos en plantas de potabilización. El asunto central de esta investigación es el análisis exergético de las plantas potabilizadoras río Cali y río Cauca en el municipio de Santiago de Cali. La metodología adoptada en esta investigación consiste en un análisis exergético comparativo de estas dos plantas de potabilización, que contempla 4 fases: 1) documentación del estudio, 2) organización de los datos, 3) cálculos de exergía y 4) aplicación del análisis y comparación exergética de las plantas potabilizadoras. A través del análisis exergético se determinó que la planta río Cauca mantiene una exergía química específico superior en todas sus etapas, en comparación con la planta río Cali. Los análisis permitieron identificar la clarificación como una operación crítica del proceso, y se encontró que el coste exergético del agua potable es mayor para la planta Río Cauca (2,58 frente a 1,97), lo cual se relaciona principalmente con la calidad del agua captada. Se concluyó que el análisis exergético es una herramienta que permite evaluar, comparar e identificar oportunidades para mejorar el desempeño del proceso de potabilización de agua.

**Palabras clave:** análisis exergético, plantas de potabilización, eficiencia exergética,

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Agudelo, Andrés; Valero, Antonio; Torres, César. Allocation of waste cost in thermoeconomic analysis. *Energy*, Volume 45, Issue 1, 2012, Pages 634-643, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.034>.
- Ahrendts, Joachim (1980). Reference states. *Energy*, Volume 5.
- Balkema, A., Preisig, H., Otterpohl, R., Lambert, F (2002). Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. *Urban Water*, Volume 4, Issue 2, Pages 153-161
- Bastidas, Mary (2014). Evaluación exergética de la calidad del agua de tres ríos en Colombia. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Botero, Edgar (2000). Valoración exergética de recursos naturales, minerales, agua y combustibles fósiles. Tesis de Doctorado. Universidad de Zaragoza, España.
- Carrasquer, Beatriz; Uche, Javier; Amaya Martínez-Gracia. Exergy costs analysis of groundwater use and water transfers. *Energy Conversion and Management*, Volume 110, 2016, Pages 419-427, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.022>.
- Cengel, A., Boles (2012). *Termodinámica*. Séptima edición. Mc Graw Hill
- Checkland, P.; Scholes, J. *La metodología de los sistemas suaves en acción*. Editorial Limusa S.A. 1994.
- Chen, G. Q., & Ji, X. (2007). Chemical exergy based evaluation of water quality. *Ecological Modelling*, 200, 259–268. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.06.015

- Chen G. Q (2004). Scarcity of exergy and ecological evaluation based on embodied exergy, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, in press, doi:10.1016/j.cnsns.2004.11.009
- Chen, G. Q., y Ji, X. (2007). Chemical exergy based evaluation of water quality. *Ecological Modelling*, 200(1-2), 259-268. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.06.015
- Cuadra, C., Valero, A., Delgado, A., y Ramírez, M. (2009). Applying Thermoconomics to The Analysis of The North American Food Chain (pp. 887–894). Presented at the 22 nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Paraná, Brazil.
- Decreto 1575/2007. Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Recuperado de [http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2007/dec\\_1575\\_2007.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2007/dec_1575_2007.pdf)
- Decreto 1594/1984. Usos del agua y residuos líquidos. Recuperado de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18617>
- Decreto 3930/2010. Usos del agua y residuos líquidas. Recuperado de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620>
- Dincer, I and Rosen, M. (2013). Exergy. Energy, Environment And Sustainable Development, Second Edi. Ontario, Canada.) resources availability: The exergy method applied to the water of a river. *Energy Conversion Management*. Vol. 39 no 16-18, pp. 1911-1917. Pergamon
- Drioli, E., Curcio, E., Profio, D., Macedonio, F., Criscuoli, A (2006). Integrating Membrane Contactors Technology and Pressure-Driven Membrane Operations for Seawater Desalination: Energy, Exergy and Costs Analysis. Volume 84, Issue 3, Pages 209-220



- EMCALI (2016). Manual de operación y mantenimiento de la planta de potabilización río Cali de EMCALI EICE ESP. Código 026M03. Versión 2.
- EMCALI (2016). Manual de operación y mantenimiento de la planta de potabilización río Cauca de EMCALI EICE ESP. Código 026M02. Versión 2.
- Financiera de Desarrollo Territorial – Findeter (2017). Informe de gestión y sostenibilidad 2017. Recuperado de <http://gestionysostenibilidad2017.findeter.gov.co/p/u/b/file/1014687>
- Fitzsimons, L., Corcoran, B., Young, P., & Foley, G. (2015). Exergy analysis of water purification and desalination: A study of exergy model approaches. *Desalination*, 359, 12–224. doi:10.1016/j.desal.2014.12.033
- Guallar J, Valero A (1987). Exergía y ambiente de referencia. Universidad de Zaragoza, departamento de ingeniería mecánica. España.
- Hepbasli, A., Turgut, E., Hikmet, T (2007). Exergetic analysis of an aircraft turbofan engine. *Energy Research*.
- Huang, L., Chen, G., Zhang, Y., Chen, B y Luan, S. (2005). Exergy as a unified measure of water quality. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 12 (2007) 663–672.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – Ideam (2015). Estudio Nacional del agua 2014. Recuperado de [http://www.andi.com.co/Uploads/ENA\\_2014.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2014.pdf)
- Johnson, C. (2014). 2.4 - Advances in Pretreatment and Clarification Technologies. En S. Ahuja (Ed.), *Comprehensive Water Quality and Purification* (pp. 60-74). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382182-9.00029-3>

- Jørgensen, S (2000). Application of exergy and specific exergy as ecological indicators of coastal áreas. Aquatic Ecosystem Health and Management. Volume 3, Issue 3, Pages 419-430
- Jørgensen, S (1997). Introduction to the development of models with dynamic structure for marine ecosystems. Ecological Modelling. Volume 102, Issue 1, Pages 1-3
- Kanoglu, Mehmet., Abusoglu, Aysegul., Demir, Sinan. (2012) Thermoeconomic assessment of a sustainable municipal wastewater treatment system. Renewable Energy.
- Karl K. Turekian. (1968). Oceans. Prentice-Hall
- Kestin, J (1980). Availability: the concept and associated terminology. Energy, Vol. 5,pp 679-692.
- Kotas, T.J. 1985. The exergy method of thermal plant analysis. Ed Essex.
- Lattouf, R; Oliveira, S. Exergy Analysis of Environmental Impact Mitigation Processes. In: Proceedings of the ECOS´2003 Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 1, Copenhagen, Denmark, 2003. P. 397-404.
- Lozano, G. Ana (2011). Análisis exergético en plantas de tratamiento en el ciclo integral del agua. Universidad Zaragoza.
- Martínez, Amaya, Uche Javier (2007). Chemical exergy assessment of organic matter in a water flow. Journal Elsevier. 2009.
- Mora C., (2009) Avaliação exergoecológica de processos de tratamento de esgoto. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia

- Mora, R (2015). Crítica del concepto de exergía. Revista de la Universidad de Costa Rica. Volumen 25, número 1
- Mora, Bejerano.; Oliveira, S. (2006). Environmental Exergy Analysis of wastewater treatment plants. Thermal Engineering. Vol.5, pp. 24-29.
- Niembro, I. (2009) Energía y exergía: enfoques hacia la sostenibilidad mediante el análisis de Ciclo de Vida.
- Rant, Z. (1956) Exergie, Ein neues Wort für "Technische Arbeitsfähigkeit". Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 22, 36-37
- Resolución 2115 de 2007. Ministerio de la protección social Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislacion%20del%20agua/Resoluci%C3%B3n%202115.pdf>
- Rosen, M (2002). Assessing energy technologies and environmental impacts with the principles of thermodynamics. Applied energy, v. 72, p. 427-441.
- Rosen, M., Dincer, I., Kanoglu, M. (2008). Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. Energy Policy 2008;36:128-137
- Schaumann, G (2007). The efficiency of the rational use of energy. Applied Energy. Volume 84, Issues 7–8, July–August 2007, Pages 719-728.
- Sciubba, E., y Wall, G. (2007). A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004. *International Journal of Thermodynamics*, 10 (1).
- Szargut, J., Morris, D. R., Steward, F. R., 1988 "Exergy analysis of thermal, Chemical, and metallurgical processes". New York: Hemisphere.

- Szargut, J (1989). Chemical exergies of the elements. Volume 32, Issue 4, 1989, Pages 269-286.
- (Szargut, J (2005). Exergy Method: Technical and Ecological Applications. ISBN 978-1-85312-753-3.
- Tai, S., Matsushige, K & Goda, T (1986) Chemical exergy of organic matter in wastewater, International Journal of Environmental Studies, 27:3-4, 301-315, DOI: [10.1080/00207238608710299](https://doi.org/10.1080/00207238608710299)
- Torres, C y Valero, A (2000). Curso de Termoeconomía. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza
- Torres, César; Valero, Antonio; Valero, Alicia. Exergoecology as a tool for ecological modelling. The case of the US food production chain. Ecological Modelling, Volume 255, 2013, Pages 21-28, ISSN 0304-3800, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.01.021>.
- Tsatsaronis, G (1994). Invited Papers on Exergoeconomics, Energy Internat. J. 19, p. 279–381.
- Tsatsaronis, G. (2007). Comments on the Paper 'A Brief Commented History of Exergy from the Beginnings to 2004'. Int. J. of Thermodynamics, 10(4), 187-192. Recuperado de: <http://www.ijoticat.com/index.php/IJoT/article/viewFile/202/188>
- Tzanakakis V.A, Angelakis A.N. (2011) Chemical exergy as a unified and objective indicator in the assessment and optimization of land treatment systems. Ecological Modelling 222 3082– 3091.
- Usón, Sergio; Uche, Javier; Martínez, Amaya; del Amo, Alejandro; Acevedo, Luis; Bayod, Ángel. Exergy assessment and exergy cost analysis of a renewable-based

and hybrid trigeneration scheme for domestic water and energy supply. *Energy*, 2018, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.124>.

- Valero, A., Uche, J., Valero, A., & Martínez, A. (2009). Physical Hydronomics: Application of the exergy analysis to the assessment of environmental costs of water bodies. The case of the inland basins of Catalonia. *Energy*, 34(m), 2101–2107. doi:10.1016/j.energy.2008.08.020.
- Valero, A.; Valero, A. (2010). Exergy analysis of resources and processes. Prensas Universitarias de Zaragoza. 1ª Edición
- Valero, Antonio; Usón, Sergio; Torres, César; Valero, Alicia; Agudelo, Andrés; Costa, Jorge. Thermoeconomic tools for the analysis of eco-industrial parks. *Energy*, Volume 62, 2013, Pages 62-72, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.014>.
- VEOLIA. 2017a. “Clarificación de Agua Mediante Decantación Lastrada: Proceso ActifloTM.” 2017. <http://www.veoliawatertechnologies.es/tecnologias/clarificacion/>.
- ———. 2017b. “Clarificación Del Agua Con Carbón Activo Para Eliminación de Pesticidas, Materia Orgánica y Disruptores Endocrinos: Proceso ActifloTM Carb.” 2017. [http://www.veoliawatertechnologies.es/tecnologias/clarificacion\\_carbonactivo/](http://www.veoliawatertechnologies.es/tecnologias/clarificacion_carbonactivo/).
- Yang, L., Hu, Sh., Chen, D., Zhang, D. (2006). “Exergy analysis on eco-industrial systems. *Science in China*” Series B Chemistry 49(3): 281-288
- Yehia M. El-Sayed. Thermoeconomics of some options of large mechanical vapor-compression units. *Desalination*, Volume 125, Issues 1–3, 1999, Pages 251-257, ISSN 0011-9164, [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00146-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00146-0).
- Zaleta-Aguilar, A.; Ranz, L., Valero, A. 1998. Towards a Unified measure of renewable

- Zubair,S y Qureshi, B (2016). Energy-exergy analysis of seawater reverse osmosis plants. Desalination 385, p. 138-147.