

Aplicación de la lógica difusa para determinar la calidad de cuerpos de agua de la cuenca del río Rímac

Application of fuzzy logic for the determination of the quality of bodies of water in the rimac river watershed

A. Aguirre¹, E. Palomino¹, G. Salazar¹

¹Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Ingeniería. Av. Túpac Amaru N° 210- Rímac- Lima

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad determinar la calidad de cinco cuerpos de agua de la Cuenca del Río Rímac los cuales pertenecen a la Categoría 1 A2: " Poblacional y Recreacional" Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional, mediante el análisis de datos que la Autoridad Nacional del Agua ANA proporcionó en su informe de Técnico de Monitoreo de la Calidad del Agua en la Cuenca del Río Rímac en el año 2013, con la finalidad de brindar una herramienta que cuantifique la calidad de los cuerpos de agua y facilite la toma de decisiones en la gestión ambiental de estos mediante la identificación de aquel que sea más propenso a la pérdida de su calidad como Categoría 1 A2. La aplicación de la metodología de Análisis de Grey Clustering y el Índice de la calidad de agua de Prati, permitieron realizar el análisis de forma objetiva, el criterio para la selección de los cuerpos de agua fue aquellos que cuyos puntos de monitoreo se encontraban más próximos al Río Rímac (aguas abajo) debido a su representatividad ya que ahí convergen todos los posible contaminantes [1] que pudiesen arrastrar desde aguas arriba. Finalmente se determinó que los cinco cuerpos de agua en estudio no se encontraban contaminados, lo cual les da las características de pertenecer a la Categoría 1 A2? ya que estos no representa un riesgo para la salud de las personas y puede ser potabilizada mediante un tratamiento convencional.

Palabras Clave: lógica difusa, análisis de Grey Clustering, calidad de agua, gestión ambiental

ABSTRACT

The purpose of the present work is to determine the quality of five bodies of water within the Rimac river watershed, by analyzing the data provided by the Autoridad Nacional del Agua (ANA - the National Water Authority) in its report on Technical Monitoring of Water Quality in the Rimac River Watershed (2013). These five bodies of water have been assigned to Category 1 A2 ("Domestic and Recreational Use") indicating that their water could be made potable through conventional treatment. The results can be used as a tool to evaluate the quality of bodies of water and facilitate their environmental management, by identifying those would be more prone to lose their qualification as Category 1 A2. Use of the Grey Clustering Analysis methodology and the Prati water quality index allowed us to carry out the analysis in an objective manner. The criteria for selecting the bodies of water was the proximity of their monitoring point to the Rimac river (downstream), because of their importance as a point of convergence of all the contaminants [1] that could be brought from upstream. It was found that the five bodies of water in consideration were not contaminated, so that they do belong to Category 1 A2. This means that they do not represent any risk for human health and can be made potable through conventional water treatment.

Keywords: fuzzy logic, Grey Clustering Analysis, water quality, environmental management.

I INTRODUCCIÓN

En Perú, gran cantidad de cuencas hidrográficas a nivel superficial han sido alteradas física, química y microbiológicamente, por efecto de la disposición de residuos líquidos y sólidos, domésticos, agrícolas, minerales, industriales, etc. En Lima, la Cuenca del Río

Rímac es de vital importancia para el abastecimiento de agua potable para toda la población y en el transcurso del tiempo esta se ha sido afectada por las diferentes actividades del hombre.[2]

La necesidad de una herramienta que integre los parámetros de los ECA para agua¹ que determinen la calidad del agua y además identifiquen si los cuerpos de

Correspondencia:
andres.aguirre.l@uni.pe , 1202.edy@gmail.com , gregoriuni@gmail.com

agua aún conservan calidad necesaria para pertenecer a la Categoría 1A2, actualmente lo más próximo a esto es identificar de forma individual que parámetro excede o no el ECA para agua, dejando de lado la realidad gradual de contaminación que los cuerpos de agua pudieran poseer.

II METODOLOGÍA

La metodología que usaremos en este trabajo para determinar la calidad y el grado de contaminación que presenta los cuerpos de agua de la Cuenca del Río Rímac que pertenecen a la Categoría 1A2, recibe el nombre de lógica difusa la cual nos permite cuantificar y comparar resultados.

La realización de este análisis se desarrolló mediante la metodología de "Análisis de Gray Clustering" y el Índice de Prati, el cual es un Índice de Calidad Ambiental que establece el grado de contaminación de un cuerpo de agua teniendo en cuenta siete (7) parámetros físico-químicos..

Ambos ayudarán a procesar de forma íntegra los datos de monitoreo cuyos resultados nos ayudarán para la identificación de zonas críticas, en caso existan, para que los pobladores no se expongan al consumo o uso directo del agua además de brindar recomendaciones para el buen manejo de aguas para proteger y recuperar la calidad del recurso hídrico, para satisfacer las necesidades actuales y requerimientos de la población.

2.1 Metodología de Análisis Gray Clustering

Se desarrolló para clasificar objetos de observación en clases definibles, y puede ser realizado por medio de Funciones de Whitenización. Dichas funciones son principalmente utilizadas para comprobar si los objetos de observación pertenecen a clases predeterminadas, las conclusiones basadas con esta certeza cognitiva podrían ser más confiables, debido a que se basa en una lógica difusa. [3].

Se supone que hay n objetos de clúster, m índices de clúster, s diferentes clasificaciones grises, según el valor muestral $x_{ij} = (1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m)$ del i -ésimo ($i = 1, 2, \dots, n$) que se opone al j ($j = 1, 2, \dots, m$) índice, el i -ésimo objeto entra en la k -ésima ($k \in \{1, 2, \dots, s\}$) clasificación gris, la cual es llamada Grey Clúster [4]. El método de Grey Clúster a desarrollar se basa en hallar las funciones de Whitenización de Grey Cluster, el cual tiene el siguiente desarrollo [4]:

- (1) hallar las funciones de Whitenización determinadas por f_j^k , donde f_j^k es la función de Whitenización de cada j -ésimo índice asociado a la clasificación gris.

- (2) hallar el peso de los clustering
- (3) hallar el coeficiente de clusterización
- (4) construir el vector de clustering
- (5) determinar a qué clase grey está vinculado cada objeto de clúster.

2.2 Modelo Matemático Aplicado

2.2.1 Índice de Prati y niveles de Contaminación

El índice de calidad de agua "Prati" permite trasladar información de concentraciones de las variables de mayor importancia a un índice que permita evaluar los niveles de contaminación de fuentes de agua superficiales. Para obtener el valor del Índice de calidad Prati se utilizaron los siguientes parámetros: oxígeno disuelto (O₂D), potencial de hidrógeno (pH), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), Nitratos (NO₃) y nitrógeno amoniacal (NH₃). [5]

La Clasificación sobre el nivel de contaminación que me brinda el índice es No Contaminado (λ_1), Aceptable (λ_2), Moderadamente Contaminado (λ_3), Contaminado (λ_4), Altamente Contaminado (λ_5)².

2.2.2 Peso de los coeficientes de clúster

Es una metodología basada en la lógica difusa que está reconocido debido gran aporte tanto en la determinación del medio físico natural como de lo social. Se basa en funciones triangulares tal como se observa en la Figura 1.

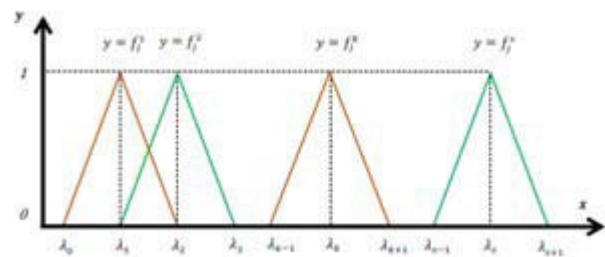


Figura 1. Funciones Triangulares

Las Funciones Triangulares en mención se realizan mediante la siguiente regla de correspondencia, también conocidas como Funciones de Whitenización [6], donde los x a evaluar serán los datos reales del monitoreo y los λ estarán conformados por los datos estándar que propone Prati.

¹ Estándar de Calidad Ambiental D.S. N° 015-2015-MINAM

² El valor que le corresponde a cada parámetro para cada nivel en mención se muestra en la Tabla N° 1

Regla de Correspondencia para determinar las Funciones de Whitenización:

$$f_j^k(x_{ij}) = \begin{cases} 0, & x \notin [\lambda_{k-1}, \lambda_{k+1}] \\ \frac{x - \lambda_{k-1}}{\lambda_k - \lambda_{k-1}}, & x \in [\lambda_{k-1}, \lambda_k] \\ \frac{\lambda_{k+1} - x}{\lambda_{k+1} - \lambda_k}, & x \in [\lambda_k, \lambda_{k+1}] \end{cases}$$

2.3 Localización

La cuenca del río Rímac se origina en la vertiente occidental de la cordillera de los Andes a una altitud máxima de aproximadamente 5,508 metros sobre el nivel del mar en el nevado Paca y aproximadamente a 132 kilómetros al nor-este de la ciudad de Lima, desembocando por el Callao, en el océano Pacífico. El área total de captación es de 3,132 km², que incluye aquella de sus principales tributarios, Santa Eulalia (1,097.7 km²) y Río Blanco (193.7 km²).

Conforme la cuenca se eleva de Lima hacia su fuente en la cordillera, el valle del río varía de un amplio plano costero, en el cual está situada Lima, a un perfil de valle bien definido que sirve de soporte a actividades agrícolas y a importantes centros de población.

2.4 Procedimiento

2.4.1 Extracción de información

Se identificó los puntos de muestreo más representativos "aguas abajo" de cada subcuenca tales como: Rrima-11 (Río Rímac), Rblan-1 (Río Blanco), RArur-2 (Río Aruri), RMayo-1 (Río Mayo) y RSant-1 (Río Santa), todas pertenecientes al ECA Categoría 1 -A2.

2.4.2 Determinación %O₂

En los monitores de calidad de agua solo se encuentra los datos de oxígeno disuelto, mediante cartas de presión y temperatura se halló el porcentaje de oxígeno saturado, el cual es un parámetro indispensable para la evaluación en el Índice de Prati.

2.4.3 Datos estándares de Prati y datos de muestra

Se busca el punto medio y luego se adimensiona los datos estándares y los datos del monitoreo. Para adimensionar ambos datos se divide cada valor de cada parámetro entre la media aritmética resultante de los 4 niveles que propone Prati en cada fila.

En la Tabla N° 1 se muestra los valores que Prati propone en su índice para cada nivel de contaminación (Del 1 al 5).

Tabla N° 1. Datos estándares Índice de Prati

Clase	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
pH Básico	6.5-8.0	8.0-8.4	8.4-9.0	9-10.1	>10.1
%O ₂	88-112	112-125	125-150	150-200	>200
DBO	0.0-1.5	1.5-3.0	3.0-6.0	6.0-12.0	>12.0
DQO	0-10	10.0-20	20-40	40-80	>80
SS	0-20	20-40	40-100	100-278	>278
NH ₃	0-0.1	0.1-0.3	0.3-0.9	0.9-2.7	>2.7
NO ₃	0-4	4.0-12	12.0-36	36-108	>108

En la Tabla N°1 Los datos reales serán evaluados tomando como referencia estos valores, los cuales son indicadores que identifica para qué valores el cuerpo de agua se encuentra contaminado o no.

Al conocer los valores que propone Prati, se busca el punto central de los intervalos y posteriormente se adimensionan los parámetros para poder realizar los cálculos que la metodología del Análisis de Grey Clustering exige, resultado de eso se observa en la Tabla N° 2.

Tabla N° 2. Datos estándares adimensionados

Clase	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
pH Básico	0,822	0,930	0,986	1,083	1,179
%O ₂	0,672	0,797	0,925	1,177	1,429
DBO	0,125	0,375	0,750	1,500	2,250
DQO	0,125	0,375	0,750	1,500	2,250
SS	0,082	0,247	0,577	1,557	2,537
NH ₃	0,044	0,177	0,531	1,593	2,655
NO ₃	0,044	0,177	0,531	1,593	2,655

En la Tabla N°3 se muestran los datos que fueron resultados del "Primer Monitoreo de la Calidad del Agua de la Cuenca del Río Rímac - 2013" - Autoridad Nacional del Agua.

Tabla N° 3. Datos reales del monitoreo

Parámetros	Cuerpo 1	Cuerpo 2	Cuerpo 3	Cuerpo 4	Cuerpo 5
pH Básico	8,21	8,40	8,00	7,60	8,17
%O ₂	103,73	104,24	103,86	106,58	97,32
DBO	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
DQO	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
SS	17	5	38	21	16
NH ₃	0,347	0,01	0,01	0,069	0,035
NO ₃	2,259	0,286	0,53	1,355	0,924

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (2016)

En la Tabla N°4 se da a conocer los valores reales del monitoreo adimensionados para que posteriormente se pueda evaluar cada valor en la Funciones de Whitenización.

Tabla N°4. Datos reales adimensionados

Parámetros	Cuerpo 1	Cuerpo 2	Cuerpo 3	Cuerpo 4	Cuerpo 5
pH Básico	0,931	0,952	0,907	0,862	0,926
%O ₂	0,698	0,701	0,698	0,717	0,654
DBO	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
DQO	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225
SS	0,140	0,041	0,313	0,173	0,132
NH ₃	0,307	0,009	0,009	0,061	0,031
NO ₃	0,050	0,006	0,012	0,030	0,020

III RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Determinación de los pesos

Para eliminar la incertidumbre al momento de establecer el peso a cada parámetro realizó la siguiente operación para determinar el peso de cada parámetro en cada nivel de contaminación correspondiente. En la Tabla N° 5 se observan los resultados.

$$\eta_j^k = \frac{\lambda_j^k}{\sum_{j=1}^m \lambda_j^k} \quad \dots (2)$$

$$\eta_j^k = \frac{1/\lambda_j^k}{\sum_{j=1}^m 1/\lambda_j^k} \quad \dots (3)$$

Tabla N° 5. Pesos de los Datos

Clase	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
pH Básico	0,016	0,047	0,099	0,185	0,237
%O ₂	0,020	0,055	0,105	0,170	0,195
DBO	0,105	0,116	0,130	0,133	0,124
DQO	0,105	0,116	0,130	0,133	0,124
SS	0,160	0,176	0,169	0,128	0,110
NH ₃	0,297	0,246	0,184	0,125	0,105
NO ₃	0,297	0,246	0,184	0,125	0,105

3.2 Evaluación en las Funciones de Whitenización

Una vez halladas las funciones, se procede a determinar los coeficientes de clúster, el cual está dado por la siguiente fórmula.

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij}) \cdot \eta_j^k \quad \dots (4)$$

En este proceso de Whitenización para simplificar las ecuaciones y facilitar en la obtención de los resultados se utilizó Software de simulación "Matlab" como una herramienta de simulación basada en eventos, que nos dio soluciones prácticos con gran énfasis en procesamiento de diversidad de variables en un solo resultado.

Tabla N°6. Función de Whitenización evaluada para el Cuerpo 1

Cuerpo 1								
Criterio	pH	%O ₂	DBO	DQO	SS	NH ₃	NO ₃	Resultado
f _{1j} (x)	0	0,792	0	0,6	0,648	0	0,955	0,466
f _{2j} (x)	0,982	0,208	0	0,4	0,352	0,633	0,045	0,332
f _{3j} (x)	0,018	0	0,667	0	0	0,367	0	0,156
f _{4j} (x)	0	0	0,333	0	0	0	0	0,044
f _{5j} (x)	0	0	0	0	0	0	0	0,000

Tabla N°7. Función de Whitenización evaluada para el Cuerpo 2

Cuerpo 2								
Criterio	pH	%O ₂	DBO	DQO	SS	NH ₃	NO ₃	Resultado
f _{1j} (x)	0	0,768	0	0,6	1	1	1	0,832
f _{2j} (x)	0,607	0,232	0	0,4	0	0	0	0,087
f _{3j} (x)	0,393	0	0,667	0	0	0	0	0,125
f _{4j} (x)	0	0	0,333	0	0	0	0	0,044
f _{5j} (x)	0	0	0	0	0	0	0	0,000

Tabla N°8. Función de Whitenización evaluada para el Cuerpo 3

Cuerpo 3								
Criterio	pH	%O ₂	DBO	DQO	SS	NH ₃	NO ₃	Resultado
f _{1j} (x)	0,213	0,792	0	0,6	0	1	1	0,676
f _{2j} (x)	0,787	0,208	0	0,4	0,8	0	0	0,235
f _{3j} (x)	0	0	0,667	0	0,2	0	0	0,120
f _{4j} (x)	0	0	0,333	0	0	0	0	0,044
f _{5j} (x)	0	0	0	0	0	0	0	0,000

Tabla N°9. Función de Whitenización evaluada para el Cuerpo 4

Cuerpo 4								
Criterio	pH	%O ₂	DBO	DQO	SS	NH ₃	NO ₃	Resultado
f _{1j} (x)	0,629	0,64	0	0,6	0,448	0,872	1	0,714
f _{2j} (x)	0,371	0,36	0	0,4	0,552	0,128	0	0,212
f _{3j} (x)	0	0	0,667	0	0	0	0	0,087
f _{4j} (x)	0	0	0,333	0	0	0	0	0,044
f _{5j} (x)	0	0	0	0	0	0	0	0,000

Tabla N°10. Función de Whitenización evaluada para el Cuerpo 5

Cuerpo 5								
Criterio	pH	%O ₂	DBO	DQO	SS	NH ₃	NO ₃	Resultado
f _{1j} (x)	0,04	1	0	0,6	0,696	1	1	0,789
f _{2j} (x)	0,96	0	0	0,4	0,304	0	0	0,145
f _{3j} (x)	0	0	0,667	0	0	0	0	0,087
f _{4j} (x)	0	0	0,333	0	0	0	0	0,044
f _{5j} (x)	0	0	0	0	0	0	0	0,000

Las Tablas N° 6, 7, 8, 9 y 10 son el resultado de evaluar cada dato real en cada Función de Whitenización. Luego de calcular el Coeficiente de cluster, se acomodan los resultados obtenidos en cada cuerpo de agua según la Tabla N° 11

Tabla N° 11. Coeficientes de Cluster

Clase	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
Cuerpo 1	0,466	0,332	0,156	0,044	0,000
Cuerpo 2	0,832	0,087	0,125	0,044	0,000
Cuerpo 3	0,676	0,235	0,120	0,044	0,000
Cuerpo 4	0,714	0,212	0,087	0,044	0,000
Cuerpo 5	0,789	0,145	0,087	0,044	0,000

Los resultados obtenidos de los distintos cuerpo de agua gracias a los valores de los parámetros de pH, SS, DBO, DQO, NO₃ y %O₂ que por medio de comparación cuantitativa tiene la siguiente jerarquía.

Tabla N° 12. Coeficiente de cluster correspondiente a cada cuerpo de agua y el nivel de contaminación

Cuerpo de Agua	Nombre	Coeficiente	Nivel
Cuerpo 2	RBLAN-1	0,832	No Contaminado
Cuerpo 5	RSANT-1	0,789	No Contaminado
Cuerpo 4	RMAYO-1	0,714	No Contaminado
Cuerpo 3	RARUR-2	0,676	No Contaminado
Cuerpo 1	RRIMA-11	0,466	No Contaminado

Todo los cuerpos de agua analizadas están en la categoría no contaminado de Prati lo cual significa que se puede usar para tratamiento de agua potable por métodos convencionales (categoría 1-A2), sin embargo el cuerpo 2 está más vulnerable a ser contaminado.

El cuerpo 1 es el que tiene menor calidad para la categoría 1-A2, esto debido a que acumula todos los agentes, sin embargo el cuerpo 5 tiene una buena calidad en comparación del cuerpo 1 a pesar de que está cercana a ella esto explica que hay fuentes que alimentan al río rímac de muy buena calidad como el

cuerpo 2 y también de mala calidad que se diluyen generando agua apta para uso poblacional y recreacional después de tratamiento convencional.

IV CONCLUSIONES

La calidad de los cinco cuerpos de agua para la categoría 1-A2 se encuentran dentro de la clasificación de Prati en no contaminado teniendo la siguiente jerarquía según la calidad de agua en los cinco cuerpos de mayor a menor calidad.

Cuerpo 2 > Cuerpo 5 > Cuerpo 4 > Cuerpo 3 > Cuerpo 1

La cuenca hidrográfica del Rímac tiene una calidad de agua no contaminado, lo que significa que las actividades antropogénicas circundantes no afecta considerablemente los cuerpos de agua, además de verificar que efectivamente los cuerpos de agua poseen la Categoría 1-A2 en ECA para agua, siendo el Río Rímac la que presenta menor calidad y el Río Blanco 2 la de mejor calidad.

En los resultados de este estudio no se llegó a obtener cuerpos de agua contaminados para la categoría 1-A2, pero nos indican que los efluentes tienen diferentes calidades de agua y por lo tanto nos da la prioridad para la intervención en la prevención por parte de las autoridades competentes.

El Río Rímac posee la menor calidad en la categoría 1-A2, esto se debe a que al estar en la la parte más baja de la cuenca del río Rímac recibe todos los afluentes al río Rímac, que generalmente son residuos doméstico, sólidos, líquidos, industriales, entre otros.

Estos resultados indican que los cuerpos de agua no están contaminados, pero sí que estos tienen diferentes calidades de agua y por lo tanto nos da la prioridad para la intervención en la prevención por parte de las autoridades competentes.

V RECOMENDACIONES

Es importante realizar otros estudios con datos actualizados ya que este se realizó mediante toma de datos puntuales del años 2013 más no de monitoreo diario en donde las condiciones meteorológicas pueden alterar los resultados.

Con estos resultados se debe sensibilizar a los actores de la cuenca a conservar y alertar que en la parte superior del Río Rímac podría presentar cierto grado de contaminación en un futuro próximo.

En la parte superior del río Rímac se debe identificar los posibles fuentes contaminantes y tomar medidas de mitigación como tratamiento de aguas ya que esta presenta una tendencia a presentar próxima a contaminación.

El presente estudio debe ser el punto de partida para el inicio de tomar medidas de mitigación concientización sobre todo alertar a la comunidad presente en dicha zona de estudio, aún se está conservando los cuerpos y que se deben seguir cuidando.

El método usado en la evaluación de la calidad de agua, muestra una respuesta que no es dicotómica (sí o no), sino muestra según el grado de la contaminación, que puede ser (contaminado al 40%, al 60%, al 80%, etc.)

La Categoría 1-A2 indica la técnica de potabilización mediante un tratamiento convencional para el consumo poblacional y uso agrícola

VI RECONOCIMIENTOS

Agradecemos al Ph. Kiko Alexi Delgado, quien nos brindó su apoyo incondicional y constante con el objetivo de desarrollar conocimiento científico.

VII GLOSARIO

Lógica Difusa: Proporciona un mecanismo de inferencia que permite simular los razonamientos de procedimiento humano en sistemas basados en el conocimiento.

Cuerpos de agua: Son lugares donde se acumula el agua al (ríos, estanques y lagos)

Calidad : Son las condiciones óptimas del medio físico natural, medidos mediante indicadores, y evaluados por organizaciones públicas y privadas, para el bienestar y desarrollo del hombre y los ecosistemas.

VII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Autoridad Nacional del Agua (2001). Identificación de fuentes contaminantes en la cuenca del río Rímac. Disponible en: <http://www.ana.gob.pe/media/identificaciondefuentescontaminantesencuencadelrimac.pdf> [2017, 25 de mayo].
- [2] SEVILLA, Juan Carlos (2016) Rímac: Historia del Río Hablador. Pág. 1339
- [3] S. Liu and Y. Lin, Grey Systems: Theory and Applications. Berlin: Springer, 2010
- [4] Liu Sifeng, Guo Tianbang. Grey system and its application (the second edition) Henan University Press, 1999. Pág.8084.
- [5] Prati L, Pavanello R, Pesarin F (1971). Assessment of surface water quality by single index pollution. Water Res. Pág 741751.
- [6] Zhou and Xu (2006), Application of Grey Clustering Method. Journal of American Science Pág 5355.