

Análisis de la variación de pH en el agua, respecto a tres factores

Proyecto de un Diseño y Desarrollo de un experimento Factorial General

Cardona, José Alberto¹; Menjivar, Marina Elizabeth¹; Ramírez, Luis Edmundo¹ y Sarmiento, Alejandra María¹

RESUMEN

El agua es indispensable para la vida y la salud, sin embargo, existen personas que no tienen acceso al agua potable, por lo tanto, la presente investigación tuvo como objetivo validar el efecto en la variación del pH producto de los cambios en los niveles de la temperatura, la salinidad y por el tipo de agua de consumo en El Salvador. Este estudio es cuantitativo de diseño experimental, con 12 tratamientos y 2 réplicas. Se evidenció que existe variación de pH relacionado con el tipo de agua, la temperatura y la salinidad.

Palabras claves: agua, pH, salinidad, temperatura.

ABSTRACT

Water is essential for life and health, however, there are people who do not have access to drinking water, therefore, in the present investigation an analysis was made of the variation of pH for different types of drinking water in El Salvador, at different levels of temperature and salinity; said study is quantitative of experimental design, with 12 treatments and 2 replications; it was evidenced that there is variation of pH related to the type of water, temperature and salinity.

Keywords: water, pH, salinity, temperature.

INTRODUCCIÓN

El agua es el solvente universal y su importancia radica en que es el medio en el que ocurren la mayoría de las reacciones bioquímicas en el cuerpo humano. Únicamente el 2.5% del agua del planeta es dulce. Los glaciares, la nieve y el hielo de los cascos polares representan casi el 80% del agua dulce, el agua

subterránea 19% y el agua de superficie accesible rápidamente sólo el 1% [1].

Por lo tanto, la calidad del agua de consumo es importante, pudiendo contaminarse con bacterias o sustancias químicas como la sal entre otros, es por ello que como equipo investigador surge la pregunta: ¿Cómo afecta la sal y la temperatura en el pH del agua de consumo en El Salvador?

Para responder se plantean aspectos teóricos del pH, la salinidad y temperatura en tres tipos de agua de consumo en El Salvador, para lo cual se elaboró el presente diseño experimental con sus respectivas comprobaciones de los supuestos como se detalla a continuación.

Definición del potencial del Hidrogeno.

El potencial de Hidrogeno (pH) es una medida que indica la acidez o la alcalinidad del agua (H_2O). Se define como la concentración de iones hidrógeno (H^+) en el agua. La escala de medición del pH es logarítmica con valores entre 0 y 14 unidades adimensionales (Figura 1). Soluciones con un pH mayor a 7.0 son clasificadas como básicas y aquellas que tienen un pH menor son ácidas. Un pH de 7.0 se considera neutro [2].

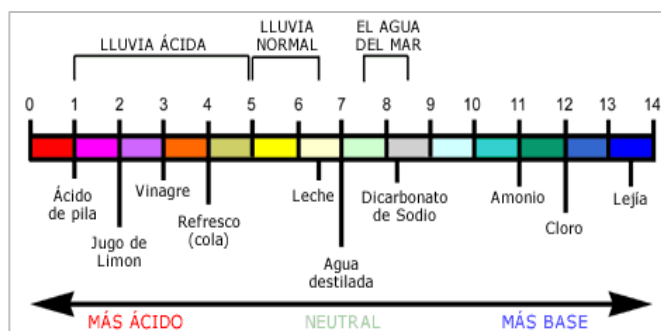


Figura 1. Escala de pH (Química y algo más, 2011).

¹ Estudiantes maestrandos de la Maestría en Estadística Aplicada a la Investigación de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA). Estudio realizado para la materia de Diseños Experimentales.

Un incremento de una unidad en el pH equivale a una disminución de diez veces mayor en la concentración de H^+ . La importancia del pH radica principalmente en lo siguiente [3].

- Los organismos vivos requieren un margen estrecho de valores de pH en el agua para su supervivencia y crecimiento.
- Los cambios de pH pueden alterar la concentración y el equilibrio de otras sustancias disueltas en el agua, modificando su calidad e incluso grado de toxicidad, por ejemplo, una disminución del pH puede aumentar la concentración de mercurio en el agua. Por el contrario, un aumento del pH puede causar la conversión de amoníaco no tóxico a la forma de amoníaco tóxico (sin ionizar).

El pH y el agua para consumo humano.

Según las Guías para la calidad del agua potable, de la Organización Mundial de la Salud (OMS), el rango óptimo generalmente aceptado para el pH en el agua para consumo humano puede estar entre 6.5 a 9.5 [4]. El pH es un importante parámetro operativo de la calidad del agua. Las aguas demasiado ácidas disuelven los metales empleados en las tuberías (plomo, cobre, zinc), los cuales, al ser ingeridos, afectan negativamente la salud. Para las aguas de consumo humano, los valores extremos pueden causar irritación en las mucosas, irritación en órganos internos y hasta procesos de ulceración [5].

El pH y la temperatura.

El pH del agua se afecta directamente con la temperatura, éste es un resultado ligero, pero sí medible. Por ejemplo, el agua pura tiene un pH de 7 únicamente a una temperatura de 25 grados Celsius. Cuando hay un incremento en la temperatura, el pH disminuye, de igual forma una disminución de temperatura implica un aumento en el pH. La causa de que se afecte el pH del agua por la temperatura es que cuando aumenta la temperatura, las moléculas tienden a separarse en sus elementos: hidrógeno y oxígeno. Al aumentar la proporción de moléculas descompuestas se produce más hidrógeno lo cual aumenta, a su vez, el potencial de hidrógeno pH [6].

El pH y la salinidad.

Las sales son electrolitos fuertes que se disocian por completo en el agua, para formar sus correspondientes iones, la hidrólisis de una sal describe la reacción ácido-base del anión (ion negativo) y/o del catión (ion positivo)

que procede de la sal al disolverse en el agua. El pH de la disolución resultante dependerá de esa reacción de hidrólisis; y, en general, se las sales cuyos iones provienen de un ácido fuerte y de una base fuerte no se hidrolizan (sus iones no reacción con el agua, solo se solvatan, es decir solo se dispersan), y sus disoluciones son neutras (pH aproximadamente 7.0). Un ejemplo de este tipo de sal es el Cloruro de Sodio ($NaCl$) o sal común [7]. Lo anterior, aplica para el agua pura y libre de moléculas que pudieran reaccionar con los iones del $NaCl$ en cuestión, principalmente con el anión Cl^- el cual es muy reactivo con la materia orgánica, y además es un desinfectante de microorganismos, el cual se consume rápidamente modificando el equilibrio iónico de la disolución y afectando el valor de pH.

METODOLOGÍA

Los estudiantes de la materia *Diseños Experimentales del grupo 1*, requieren validar el efecto en la variación del pH producto de los cambios en los niveles de la temperatura, la salinidad y por el tipo de agua. Para ello, se toman tres distintos tipos de agua, dos de agua embotellada (Cristal y Alpina), y una proveniente de la red de servicio público de ANDA, obtenida a través de un grifo de una casa, ubicada en el casco urbano del municipio de Mejicanos del departamento de San Salvador. Se utilizaron tres tipos de agua con el fin de verificar con qué tipo de agua se puede producir un desequilibrio por reacción de los iones de Sodio (Na^+) y de Cloro (Cl^-), disociados de la sal común que, en teoría en un agua pura, no tendrían que modificar el valor del pH, debido a que no se hidrolizan (no reacción con la molécula de agua).

Además, para observar el efecto de la temperatura en el valor del pH, las muestras se sometieron, a dos rangos de temperatura:

- El primer rango fue entre 1 y 7 grados Celsius, el cual se denominó como “**Helada**”.
- El segundo rango fue entre 23 y 29 grados Celsius, denominada como “**Ambiente**”.

Como se indicó anteriormente, para evaluar el posible efecto del tipo del agua sobre los iones disociados del $NaCl$, se consideró agregar como un tercer factor de estudio la concentración de $NaCl$ obtenido de sal común comercial, para determinar el impacto en la variación de pH de las muestras.

Para determinar el rango superior de la concentración de sal que será agregada a las muestras de agua en el experimento, se investigó la solubilidad del $NaCl$ en

agua, a diferentes temperaturas, por ejemplo, a 0°C la solubilidad (en g NaCl/100 g de Agua) del NaCl en agua es aproximadamente 35.7, a 20 °C es 36.0 y 50° es 37.0 g NaCl/100 g de Agua [8], lo cual demuestra que la sal común mantiene una solubilidad parecida en un amplio margen de temperaturas. Debido a que los rangos de temperaturas del experimento varían entre 1 °C-7 °C y 23 °C-29 °C, se decidió utilizar como referencia la solubilidad del agua a 4 °C aproximadamente 35.7 g de NaCl/100 g H₂O, a esta temperatura la densidad del agua es 1 g/ml, lo que nos daría una solubilidad del NaCl a 20 °C igual a 35.7 g de NaCl/100 ml de H₂O, lo cual al transformar en onzas de NaCl queda como **1.26 onzas de NaCl/100 ml de H₂O**. Debido a que se contó con una balanza de resorte casera con una de sus escalas en onzas, se decidió utilizar como rango superior de salinidad, la dilución de **1 onza de sal común por cada 100 ml de muestra de H₂O**, lo cual representaría aproximadamente el 80% de la máxima solubilidad del NaCl en los rangos de temperatura del experimento, debido en parte a que se desconoce la salinidad base con las cuales contarán las muestras.

Los rangos de salinidad, en función de la concentración de la sal común en la muestra de agua fueron:

- 0 onzas de sal/100 ml de agua, a este rango de salinidad lo denominamos “**Ninguna**”.
- 1 onza de sal/100 ml de agua, a este rango de salinidad lo denominamos “**Alta**”.

La variable de decisión en el modelo es la variación del pH a medirse en cada una de las experimentaciones, luego de haber aleatorizado el diseño completo.

El volumen de cada una de las muestras fue de 100 ml, medido con una probeta de grado semi-analítica.

Resumen del diseño experimental y del diseño completo del estudio.

- Unidad experimental: agua apta para consumo humano, a la cual tiene acceso la población en el área metropolitana de San Salvador.
- Factores y niveles (independientes y de fondo):
Independientes.
 - Tipo de agua:
 - a) Cristal
 - b) Alpina
 - c) ANDA
 - Nivel de temperatura del agua:
 - a) Helada
 - b) Ambiente
 - Nivel de salinidad que se agregará al agua:

a) Ninguna

b) Alta

- De fondo, que no se pueden controlar.
 - Salinidad base de las muestras, la cual es desconocida.
 - Uso de sal común, en lugar de NaCl grado reactivo de alta pureza.
 - Impurezas presentes en la sal común a utilizar, y sustancias químicas presentes en el agua.
 - Diferencia de días en que se tomaron las muestras de agua de ANDA, debido a que el agua que se puso a enfriar se tomó unos días antes.
 - Diferencia en la calidad de cada tipo de agua.
 - Material de embotellado para cada tipo de agua.
 - Temperatura ambiente durante la toma de datos.
 - Aumento de temperatura de las muestras heladas mientras se realiza la experimentación con cada una (inestabilidad térmica durante la medición).
 - Error en la toma de medición por parte del experimentador.
 - No utilización de cristalería de alta precisión, se utilizaron recipientes de vidrio caseros y no de grado analítico. Además, se utilizó una probeta de grado semi-analítica no calibrada.
 - Uso de balanza de resorte casera, sin certificado de calibración, y de muy baja precisión, en lugar de una balanza de grado analítica o ultra-analítica calibrada.
 - Uso de medidor de temperatura de tipo laser no invasivo con precisión de $\pm 2\%$, en lugar de un termómetro de alta precisión en contacto con el agua.
 - Utilización de medidor de pH digital portátil tipo “lápiroz” de precisión de hasta ± 0.1 pH.
- Variable de respuesta: **pH del agua**.

La matriz de experimento completo con sus réplicas y aleatorizado se presenta en la siguiente Tabla 1. Para los factores y niveles definidos, hay 12 tratamientos posibles. La cantidad mínima de replicas por cada tratamiento para el diseño propuesto fueron dos, lo cual significó 24 experimentaciones que fueron realizadas. El orden aleatorio en que se realizó cada experimentación, para garantizar el supuesto de independencia, se presenta en la siguiente Tabla:

Tabla 1. Matriz de experimentación aleatorizada y orden en que se tomaron los datos.

Temperatura	Salinidad	Tipo de Agua	Orden de experimentación
Helada	Alta	Cristal	1
Ambiente	Alta	Alpina	2
Ambiente	Ninguna	Cristal	3
Ambiente	Alta	ANDA	4
Helada	Alta	ANDA	5
Helada	Alta	Alpina	6
Helada	Alta	Alpina	7
Ambiente	Ninguna	Alpina	8
Ambiente	Alta	Cristal	9
Ambiente	Ninguna	ANDA	10
Ambiente	Ninguna	ANDA	11
Ambiente	Alta	ANDA	12
Helada	Ninguna	Alpina	13
Ambiente	Alta	Alpina	14
Helada	Ninguna	ANDA	15
Helada	Alta	ANDA	16
Ambiente	Ninguna	Cristal	17
Helada	Ninguna	Cristal	18
Ambiente	Alta	Cristal	19
Helada	Ninguna	Cristal	20
Helada	Ninguna	ANDA	21
Helada	Ninguna	Alpina	22
Ambiente	Ninguna	Alpina	23
Helada	Alta	Cristal	24

Fuente: Elaboración propia

El método para la preparación del tratamiento y su toma de datos, según la combinación de factores fue el siguiente:

- Si la muestra era de tipo “Helada” se tomaba una medida de temperatura preliminar al agua, para verificar que estuviera dentro del rango requerido como “Helada”, sino estaba dentro del rango se procedía a introducir al congelador para un descenso rápido de la temperatura. Para las muestras en nivel de temperatura “Ambiente”, este paso no era necesario.
- Con la probeta se procedía a medir un volumen de 100 ml de agua helada y se depositaba en un vaso de vidrio identificado. Este paso era necesario para todas las muestras.
- Si la muestra era con salinidad “Alta”, posteriormente se pesaba 1 onza de sal en la balanza y se depositaba en el vaso con la muestra de agua helada. Para las muestras con salinidad “Ninguna” este paso no era necesario.
- Si la muestra era con salinidad “Alta”, además se colocaba el vaso de vidrio sobre la lámpara led, con

el fondo a contraluz para poder verificar la dilución de la sal y la existencia de impurezas, y en paralelo se realizaba la dilución de forma manual con la cuchara. Para las muestras con salinidad “Ninguna”, este paso no era necesario.

- Si la muestra era de tipo “Helada” se medía una segunda vez la temperatura, para verificar que no se hubiera salido del rango requerido. Si la temperatura había sobrepasado el nivel máximo de 9°C, se procedía a ingresar el vaso a la parte del congelador, para garantizar un descenso rápido del nivel de temperatura para proseguir a tomar de pH, una vez se logrará estar dentro del rango requerido de temperatura “Helada”. Para las muestras en nivel de temperatura “Ambiente”, este paso no era necesario.
- Al garantizar que las muestras estuvieran en los rangos de temperatura y salinidad, se procedía a realizar la medición de la temperatura a la cual se mediría el pH, e inmediatamente después se realizaba la medición de pH.
- Era necesario esperar que el valor del pH se estabilizara en el medidor, lo cual según el tipo de muestra podría demorar entre 1 a 5 minutos.
- Una vez se estabilizaba el valor de pH se procedía a anotar de forma manual en una libreta de datos.

RESULTADOS

Los resultados del experimento para la variable de respuesta de pH, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: pH para cada réplica y tratamiento propuesto

Temperatura	Salinidad	Tipo de Agua	Nivel pH (Respuesta)
Helada	Alta	Cristal	6.62
Ambiente	Alta	Alpina	6.81
Ambiente	Ninguna	Cristal	6.94
Ambiente	Alta	ANDA	6.38
Helada	Alta	ANDA	6.83
Helada	Alta	Alpina	6.68
Helada	Alta	Alpina	6.64
Ambiente	Ninguna	Alpina	8.30
Ambiente	Alta	Cristal	5.83
Ambiente	Ninguna	ANDA	7.38
Ambiente	Ninguna	ANDA	7.35
Ambiente	Alta	ANDA	6.48
Helada	Ninguna	Alpina	7.68
Ambiente	Alta	Alpina	6.78
Helada	Ninguna	ANDA	7.87
Helada	Alta	ANDA	6.87
Ambiente	Ninguna	Cristal	7.10

Temperatura	Salinidad	Tipo de Agua	Nivel pH (Respuesta)
Helada	Ninguna	Cristal	7.95
Ambiente	Alta	Cristal	6.02
Helada	Ninguna	Cristal	8.15
Helada	Ninguna	ANDA	7.94
Helada	Ninguna	Alpina	7.99
Ambiente	Ninguna	Alpina	8.10
Helada	Alta	Cristal	6.88

Fuente: Elaboración propia.

Modelo Estadístico

El estadístico utilizado es el diseño factorial de un modelo general.

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijk}; \begin{cases} i = 1, 2, 3, \dots, a \\ j = 1, 2, 3, \dots, b \\ k = 1, 2, 3, \dots, c \end{cases}$$

Análisis de Significancia

Del análisis de varianza (ANOVA), realizado en el software RStudio versión 5.12, se determinó que los tres factores y una interacción entre dos de ellos, son estadísticamente significativos, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3. Factores significativos según ANOVA.

Factor o interacción	p-valor
Temperatura	3.24 E -6
Salinidad	1.34 E -11
Tipo de agua	2.95 E -5
Interacción entre la Temperatura y el tipo de agua	1.21 E -6

Fuente: Elaboración propia con resultados de RStudio V5.12

Comprobación de Supuestos

Se comprobó que se cumplen todos los supuestos del diseño experimental, debido a que el p-valor para cada prueba fue mayor que el nivel de significancia de 0.05. En la tabla siguiente se presentan los resultados para cada prueba:

Tabla 4. Resultados de comprobación de los supuestos.

Supuesto	Prueba estadística	p-valor
Normalidad	Anderson-Darling	0.8267
Homocedasticidad	Prueba de Bartlett	0.6394
Independencia	Test de Durbin-Watson	0.7418
Aditividad (Test de Tukey)	Temperatura y Salinidad	0.9646
	Temperatura y Tipo de Agua	0.4120
	Tipo de Agua y Salinidad	0.8887

Fuente: Elaboración propia con resultados de RStudio V5.12

Evaluación de los Efectos

Al realizar una evaluación de los efectos para los factores e interacciones estadísticamente significativas, se obtuvo lo siguiente

Tabla 5. Resultados de análisis de efectos.

Factor estadísticamente significativo	Porcentaje de variabilidad explicada en la variable de respuesta	Tamaño del efecto
Temperatura	7.79%	Pequeño
Salinidad	70.54%	Grande
Tipo de agua	6.65%	Pequeño
Interacción entre la Temperatura y el tipo de agua	12.33%	Mediano

Fuente: Elaboración propia con resultados de RStudio V5.12

En la Figura 2 se presenta el efecto de la salinidad en el pH según el tipo de agua.

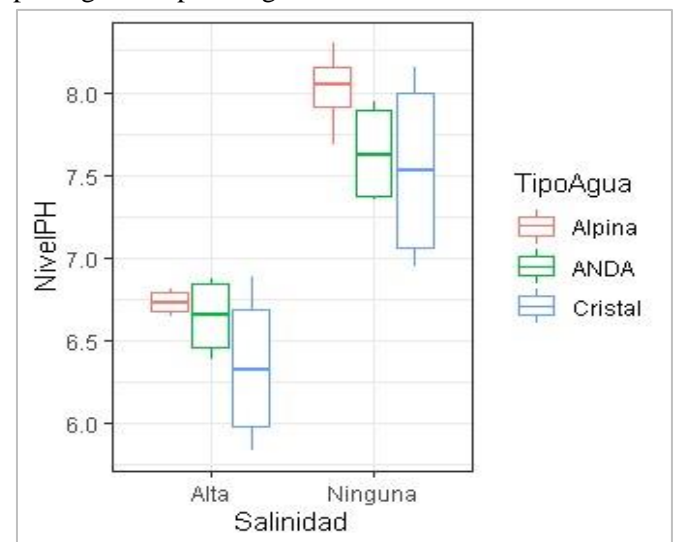


Figura 2. Variación del pH respecto a la salinidad y tipo de agua.

Pruebas Multimedia

Para detectar las diferencias entre los promedios de los grupos, para cada factor estadísticamente significativo en el ANOVA, se realizaron dos pruebas multimedia (Fisher y Tukey), resultando lo siguiente:

- **Temperatura:** la variación en el nivel de pH en el agua, de acuerdo con el cambio en el nivel de temperatura, fue en promedio de 0.385834 unidades de pH.
- **Salinidad:** la variación en el nivel de pH en el agua, de acuerdo con el cambio en la concentración de NaCl

(salinidad), fue en promedio de 1.160834 unidades de pH.

- **Tipo de agua:** la variación en el nivel de pH en el agua, de acuerdo con el tipo de agua, fue en promedio de:
 - Entre Alpina y ANDA=0.2350 unidades de pH.
 - Entre Alpina y Cristal=0.436250 unidades de pH.
 - Entre ANDA y Cristal=0.201250 unidades de pH.

Esto significa que los niveles del diseño experimental fueron adecuadamente establecidos para cada factor, debido a que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de la variable de respuesta para cada uno.

CONCLUSIONES

- Existe un efecto sobre la variación de pH del agua, debido al cambio de los niveles de temperatura establecidos en el experimento. Se pudo validar lo establecido en la teoría que a mayor temperatura el nivel de pH desciende y el agua tiende a acidificarse ($\text{pH} < 7.0$).
- El cambio en los niveles de salinidad del experimento causa un cambio en la variación del pH del agua. Lo que indirectamente comprueba que los tipos de agua utilizadas tienen concentraciones de moléculas que reaccionaron con los iones del NaCl, provocando la variabilidad en el pH. Para este experimento la Salinidad presentó el mayor efecto en la variabilidad del nivel de pH.
- El cambio en los tipos de agua utilizados en el experimento tiene un efecto sobre la variación del pH. Se observó que el agua de ANDA presentó un promedio de pH más neutro, mientras que el tipo de agua Cristal fue en promedio más ácida. No obstante, los tres tipos de agua presentaron promedios de pH en el rango sugerido por la OMS para su consumo que es entre 6.5 y 9.5 [4].
- La interacción de la temperatura con el tipo de agua tiene un efecto sobre la variación del pH. Lo cual valida nuevamente la teoría que indiferentemente el tipo de agua, siempre la temperatura tendrá un efecto sobre el pH.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fernandez Cirelli A, 2012, "El agua: un recurso esencial," *Quimicaviva*, vol. 11, no. 3, pp. 147-170.
- [2] Química y algo más, «Química y algo más,» 2011. [En línea]. Available: <https://quimicayalgomas.com/quimica-general/acidos-y-bases-ph-2/>.
- [3] Water Boards, «California Water Boards,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.waterboards.ca.gov/>.
- [4] OMS, Guías para la calidad del agua potable, Tercera ed., vol. 1, Organización Mundial de la Salud, 2006.
- [5] E. Pérez López, «Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica,» *Tecnología en Marcha*, 2016.
- [6] HANNA, «La Temperatura afecta el pH del Agua,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.hannacolombia.com/blog/post/39/la-temperatura-afecta-el-ph-del-agua#:~:text=Cuando%20hay%20un%20incremento%20en,sus%20elementos%3A%20hidro%20geno%20y%20ox%C3%ADgeno..>
- [7] EII, «Escuela de Ingenierías Industriales,» 2022. [En línea]. Available: <http://www.eis.uva.es/organica/practicas/P4-Hidrolisis.pdf>.
- [8] J. M. Calahorra, «ejercicios-fyq.com,» 2009. [En línea]. Available: <https://ejercicios-fyq.com/Grafica-de-solubilidad-a-partir-de-datos>.