

LLUVIA ÁCIDA Y ALMEJAS: UN ESTUDIO EN LA ESCUELA NAVAL

♦ RESUMEN ♦

Los efectos contaminantes de la lluvia ácida son diversos. Entre ellos se encuentra la modificación química de los ecosistemas, con consecuencias para la flora y fauna circundante. Esta investigación tiene como objetivo cuantificar la pérdida de masa de almejas en soluciones de agua potable, bicarbonato de sodio y ácido sulfúrico que presentan distinto pH. Los resultados indican que, a mayor acidez, mayor es la tasa de deterioro de la calcita; no obstante, en agua potable el deterioro es mayor.

Palabras clave: Lluvia, almeja, ácido, calcita.

ACID RAIN AND CLAMS CALCIFICATION: A STUDY AT THE NAVAL ACADEMY

♦ ABSTRACT ♦

Acid rain impacts marine ecosystems by chemically altering aquatic environments, with deleterious effects on their flora and fauna. This study quantifies the mass loss in clam shellfish exposed to varying pH levels, using solutions of drinking water, sodium bicarbonate, and sulfuric acid. The results point out that while increased acidity accelerates the degradation of calcite structures, the rate of deterioration remains unexpectedly high even in potable water. This highlights the complex interplay between chemical composition and biological degradation in calcifying organisms.

Keywords: Acid rain, clam, calcite.



FELIPE GALLARDO VARGAS

Escuela Naval "Arturo Prat"
Magister en Didáctica de las Ciencias Experimentales
(felipe.gallardo.v@gmail.com)
Valparaíso, Chile.
DOI: <https://doi.org/10.63598/marina.v144i1013.203>

VALESKA CAMPOS OLIVERA

Escuela Naval "Arturo Prat"
Magister en Gestión en Educación Superior
(v.campos.oli@gmail.com)
Valparaíso, Chile.

EMILIA BUGUEÑO FUENTES

Cadete Escuela Naval "Arturo Prat"
(ebuguenof@gmail.com)
Valparaíso, Chile.

Las costas de Chile se enfrentan a múltiples factores que afectan e interfieren los ecosistemas presentes en el territorio nacional. Entre ellos se pueden mencionar marejadas, tsunamis y terremotos, los cuales generan alteraciones físicas. Por otra parte, también se registra contaminación por efecto antropogénico, tal como la presencia de metales pesados y lluvia ácida, que provocan una contaminación química del agua, tierra y aire. Entre los lugares donde se han evidenciado mayor cantidad de contaminación por estas últimas causas está la zona del complejo industrial de Las Ventanas, que se encuentra en la Región de Valparaíso, en las cercanías de Quintero y Puchuncavi, denominada "Zona de Sacrificio". En esta zona se han registrado contaminantes tales como emisiones de dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), metales como mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb) y material particulado (PM_{2,5} y PM₁₀). Estos agentes han provocado diversos problemas de salud a las personas que habitan en las cercanías del complejo industrial, incluso llegando a suspender algunas jornadas académicas de los colegios por los altos niveles de contaminación registrados por efecto de la alta densidad industrial y el alto tráfico vehicular de la zona (Toro, Claramunt, González, Ávila y Leiva, 2024).

La contaminación en el aire que repercute en el agua y en la tierra - La lluvia ácida

La emisión a la atmósfera de gases como dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno genera diversos efectos en el ecosistema, repercutiendo en procesos naturales de la flora y fauna que habita en dicha zona de Chile. En este sentido, los gases producidos por la combustión de combustibles fósiles, la industria y gases de escape de automóviles, reaccionan químicamente con la humedad atmosférica para producir lo que se conoce como "precipitaciones ácidas" o "lluvia ácida". Estas se caracterizan

por presentar una acidez mayor al agua lluvia normal, presentando valores de pH menores a 5,6, donde el ácido sulfúrico (H₂SO₄) y el ácido nítrico (HNO₃) son los principales responsables de ello (Zhang, Li, Tan, Li, Singh, Yang, Bolan, Chen, Xu, Bao, Lv, Peng, Zhou y Wang, 2023).

El ácido sulfúrico se produce en la atmósfera, a través de un mecanismo que contempla tres etapas. La primera involucra la oxidación del dióxido de azufre por el radical hidroxilo (OH·), para formar el intermediario de naturaleza radicalaria HOSO₂·. Luego, en la segunda etapa, este radical es oxidado por el oxígeno (O₂) del aire, produciendo trióxido de azufre (SO₃) y HO₂. Finalmente, la última fase corresponde a la hidratación del SO₃ para producir ácido sulfúrico (H₂SO₄), uno de los principales componentes de la lluvia ácida (Yuan, Liu, Trabelsi, Zhang, Li, Francisco, Guo & Wang, 2024). Las ecuaciones químicas del proceso se representan a continuación.

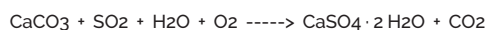
Reacción 1: $\text{OH} \cdot + \text{SO}_2 \rightarrow \text{HOSO}_2 \cdot$

Reacción 2: $\text{HOSO}_2 \cdot + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{SO}_3$

Reacción 3: $\text{SO}_3 + n \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + (n - 1) \text{H}_2\text{O}$

Como consecuencia de la acidificación del agua lluvia se han reportado múltiples efectos. Entre ellos se pueden mencionar alteraciones en la fotosíntesis y crecimiento de plantas, además de la cantidad, tamaño y calidad de diversos cultivos, entre otras (Zhang et al., 2023). Por otra parte, las estructuras metálicas, especialmente acero o bronce, se ven alteradas por provocar pérdida de masa por efectos corrosivos. Además, en el caso de las conchas calcáreas, que principalmente se componen de carbonato de calcio (CaCO₃), también se ven afectadas debido a que los carbonatos son solubles en ambientes ácidos, provocando que los moluscos vean deteriorada su capa protectora frente a depredadores y a la presión que ejerce el agua de mar en ellos (Livingstone, 2016). En este último caso, el ácido sulfúrico descompone químicamente la calcita formando sulfato de calcio dihidratado, comúnmente denominado yeso (CaSO₄ · 2 H₂O), el cual presenta una solubilidad mayor que el carbonato de calcio, produciendo un

deterioro de la concha calcárea. Además, se observa la producción y liberación de dióxido de carbono como un subproducto de los procesos, cuyas ecuaciones se detallan a continuación (Li, Bai, y Pan, 2025).



Estos efectos reportados en las conchas pueden producir cambios importantes en los ecosistemas, lo que puede llevar a una disminución de la flora y fauna en las costas. Los efectos de este tipo de problemáticas son múltiples, entre los cuales está el impacto en la industria, la economía local y nacional. En base a los aspectos antes descritos, el objetivo de este trabajo es cuantificar la pérdida de masa en conchas de almeja chilena inmersas en diferentes condiciones de acidez, simulando escenarios de acidificación como consecuencia de la presencia de ácido sulfúrico en la lluvia ácida.

Metodología

Para cumplir con el objetivo descrito previamente, el estudio centra sus cimientos en una metodología cuantitativa y un alcance correlacional (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2023). La variable dependiente corresponde a la masa de calcita y la variable independiente la acidez de las soluciones en que se realizará el estudio. La muestra

utilizada fueron cinco conchas de almeja chilena (sp. *Ameghinomya antiqua*) (Instituto de Fomento Pesquero, 2021), donde cuatro de ellas se utilizaron sin realizar ninguna alteración a su superficie, mientras que la quinta fue tratada con una solución de etanol/agua previo al inicio de los experimentos. Las condiciones empíricas empleadas en el estudio se detallan en la tabla 1.

Las soluciones de bicarbonato de sodio y ácido sulfúrico utilizadas fueron preparadas utilizando agua destilada, disolviendo la cantidad de soluto necesaria para obtener la acidez requerida. Para confirmar que las soluciones se encontraban en el pH específico, se utilizó un pH-metro marca HANNA HI 8424, el cual fue calibrado previo a la preparación de las soluciones.

Para evaluar el cambio de masa de las muestras en cada una de las soluciones, las conchas fueron sometidas a cada condición química descrita en la tabla 1 durante un lapso, midiendo su masa inicial, masa final y el respectivo cambio. Una vez transcurrido un tiempo determinado, el detalle del procedimiento que se aplicó a cada muestra se expone en la siguiente tabla 2.

De esta manera, una vez realizado el procedimiento, las conchas se depositan en las soluciones de trabajo y se repite el proceso cada vez que se determinó la masa de ellas durante la investigación.

Ensayo	Muestra	Solución	pH	Observación
1	Almeja	Solución de bicarbonato de sodio (NaHCO_3)	8,1	Límite superior pH agua de mar
2	Almeja	Solución de bicarbonato de sodio (NaHCO_3)	7,8	Límite superior pH agua de mar
3	Almeja	Agua potable	7	Agua potable de la Región de Valparaíso
4	Almeja	Solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4)	5	Acidez lluvia ácida
5	Almeja	Solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4)	5	Acidez lluvia ácida

Tabla 1: Condiciones de trabajo experimental aplicada a cada muestra. (Fuente: Elaboración autor artículo).

Etapa	Sustancia/Equipo Empleado	Observación	Justificación
1		Se extrae la muestra de la solución	
2	Agua destilada	Se utiliza en cantidades abundantes	Arrastra agentes contaminantes solubles en agua.
3	Acetona	Se utiliza en cantidades moderadas	Arrastra residuos de agua, permitiendo un secado más rápido.
4	Estufa	90° C durante 4 horas	Tiempo en que la muestra se seca completamente. Así, potenciales cantidades de agua y acetona no interfieren en la masa final de la muestra.
5	Balanza analítica	Se registra su masa	Permite el registro de la masa con una precisión de la diezmilésima parte.
6	Solución química	Se sumerge en la solución de trabajo	

Tabla 2: Tratamiento aplicado a cada muestra para determinar el cambio de masa. (Fuente: Elaboración autor artículo).

Día	Masa (g) Muestra 1 pH 8,1	Masa (g) Muestra 2 pH 7,8	Masa (g) Muestra 3 pH 7	Masa (g) Muestra 4 pH 5	Masa (g) Muestra 5 pH 5
0	16,4616	17,0255	21,6062	21,3813	23,5259
4	16,4492	17,0152	21,5861	21,3455	23,4925
7	16,3118	16,8885	21,419	21,2039	23,3322
10	16,2448	16,7868	21,3003	21,1168	23,2266
14	16,2291	16,7726	21,2888	21,1036	23,2083
18	16,1938	16,7271	21,2455	21,0516	23,164
25	16,172	16,6952	21,2067	21,007	23,1128
28	16,1458	16,6519	21,142	20,9699	23,0709
32	16,1206	16,591	21,0796	20,8998	23,0064

Tabla 3: Registro de masa de cada muestra conforme avanzó el tiempo. (Fuente: Elaboración autor artículo).

Resultados

Para realizar la cuantificación de la pérdida de masa de cada muestra sometida a las condiciones químicas descritas en el apartado anterior, se registró la masa de las conchas en determinados tiempos. Los resultados obtenidos se exponen en la tabla 3.

En la tabla se observa que la totalidad de las muestras presenta una disminución de la masa a medida que avanza el tiempo, aspecto que es concordante con los datos de Li et al. (2025). Así, es determinante identificar patrones en

relación con la pérdida de masa respecto de la acidez de la solución. Para ello se realizaron gráficos de masa v/s tiempo con el propósito de confirmar la relación que existe entre la pérdida de masa y el pH de la solución (figura 1).

Todas las gráficas presentan una pendiente negativa; no obstante, esta varió durante el transcurso de los experimentos. Para poder realizar una comparativa general de los procesos, se trazó la mejor curva para cada caso. A partir de lo anterior el mejor ajuste resultó en una tendencia lineal, cuya pendiente entrega la información relacionada

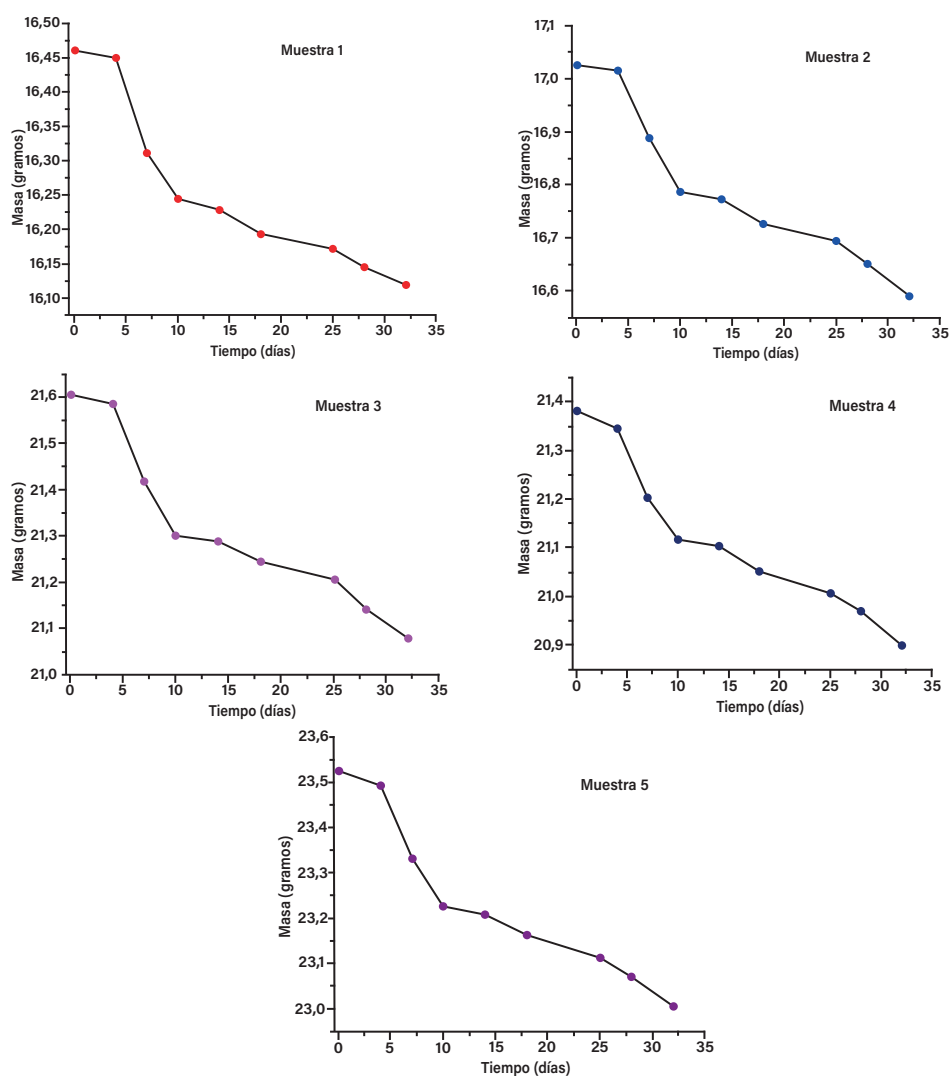


Figura 1: Gráficos masa (g) vs tiempo (días) de cada muestra. (Fuente: Elaboración autor artículo).

con la tasa de pérdida de masa (gramos) por unidad de tiempo (días) en cada uno de los casos. El resumen de los datos relacionados con las ecuaciones de la recta y sus valores del coeficiente de determinación (R^2) para cada caso, se expone en la tabla 4.

En términos generales, se puede observar que la tasa de pérdida de masa por día (pendiente) para las muestras de conchas presentes en ambientes ácidos es mayor que las expuestas a ambientes de acidez normales del agua de mar. Esto permite considerar que la correlación propuesta según la literatura es correcta, es decir, la lluvia ácida descompone más rápidamente las conchas calcáreas que ambientes levemente básicos.

Si bien a partir de los datos antes descritos se puede extraer la tendencia mencionada, un análisis más detallado de las gráficas muestra que el deterioro de la totalidad de las conchas

fue diferente en el primer tercio respecto de los segundos tercios, observándose una tendencia más estable, de características lineales. Para evidenciar este efecto, en la siguiente tabla se separan los datos en dos tramos, entre 0 - 10 días y entre 10 - 32 días.

Los resultados demuestran que para todas las muestras la descomposición en los primeros 10 días fue más rápida que en los siguientes 22, puesto que la pendiente decrece de manera importante. Esto orienta a considerar que es probable que sobre la concha se haya formado una sustancia que interfiere en el proceso de descomposición de esta, que según la información de Li et al. (2025) podría corresponder a sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ - yeso), que estaría actuando como un pasivante de la superficie.

En el caso de los resultados en relación con la muestra de agua potable, se observa

Muestra	pH	Masa inicial (g)	Pendiente (g/día)	R^2	Masa perdida después de 32 días	Tiempo de pérdida 1% (días)
1	8,1	16,4616	- 0,0103	0,855	0,341	15,9
2	7,8	17,0255	- 0,0131	0,912	0,434	13
3	7	21,6062	- 0,0156	0,898	0,527	13,8
4	5	21,3813	- 0,0134	0,886	0,482	15,9
5	5	23,5259	- 0,0153	0,906	0,52	15,3

Tabla 4: Resumen de la pendiente registrada para cada muestra y el respectivo coeficiente de determinación (R^2) después de 32 días de experimentación. (Fuente: Elaboración autor artículo).

Muestra	pH	Pendiente 0 - 10 días (g/día)	R^2 0 - 10 días	Pendiente 10 - 32 días (g/día)	R^2 10 - 32 días
1	8,1	- 0,0233	0,883	- 0,0057	0,9744
2	7,8	- 0,0249	0,876	- 0,0073	0,9674
3	7	- 0,0321	0,8909	- 0,0098	0,9404
4	5	- 0,0278	0,9267	- 0,0095	0,9634
5	5	- 0,0314	0,9156	- 0,0097	0,9718

Tabla 5: Resumen de la pendiente registrada para cada muestra y el respectivo coeficiente de determinación (R^2) durante los primeros 10 y los últimos 22 días respectivamente. (Fuente: Elaboración autor artículo).

que la pendiente es la mayor de todos los experimentos. Estos datos se pueden fundamentar en el comportamiento químico del carbonato, ya que en pH más ácidos este ion neutraliza rápidamente el ácido y el pH de la solución aumenta paulatinamente hasta alcanzar valores ligeramente básicos. Además, la ausencia de iones sulfato (SO_4^{2-}) impide la formación de yeso, lo que no da lugar a la formación de la capa pasivante sobre la superficie de la muestra.

Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que existe una relación entre el grado de acidez (producido por ácido sulfúrico - principal componente de la lluvia ácida) de una solución y la tasa de deterioro de la almeja presente en las costas de Chile. Así, a mayor acidez mayor es la tasa de pérdida de masa de calcita. De esta manera, se observan pérdidas de masas totales en un rango entre 0,341 g y 0,527 g, las que corresponden porcentualmente a entre un 2,1 y 2,6 % durante el transcurso de 32 días. Por otra parte, también se observó un comportamiento correspondiente a dos etapas, una inicial de rápida descomposición de carbonato de calcio y una segunda donde si bien la tasa es más lenta, continúa decreciendo. Finalmente, en términos biológicos, se puede observar que un cambio en la acidez del agua de mar puede provocar importantes daños en las conchas calcáreas de los

animales presentes en nuestras costas, como consecuencia de la contaminación producida en las zonas de sacrificio.

Proyecciones

Como proyección, se continuará con el estudio de la pérdida de masa bajo las mismas condiciones descritas en este trabajo, de tal manera de poder obtener información en un lapso mayor que 32 días. Con lo anterior se espera obtener mayor evidencia y sustento para cumplir con los objetivos trazados. Por otra parte, también se visualiza la necesidad de replicar la investigación con una mayor cantidad de muestras por cada solución utilizada, lo que permitirá realizar estudios estadísticos que servirán como evidencia para consolidar los resultados obtenidos. Por otro lado, la obtención de registros fotográficos o micrográficos entregará información fundamental para visualizar cómo los efectos de pérdida de masa impactan en la morfología y rugosidad de la superficie de cada muestra. Además, también se proyecta la realización de los análisis, utilizando una solución de ácido nítrico, que, si bien también presentará un pH 5, las características fisicoquímicas de esta sustancia son diferentes de las del ácido sulfúrico. Finalmente, también se podría estudiar si el comportamiento de otros bivalvos en las condiciones implementadas es concordante con el de la almeja.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Basoa, K., Fleming, Z.L., Leiva, M.A., Concha, C., & Menares, C. (2025). Current status, trends, and future directions in Chilean air quality: A data-driven perspective. *Atmosphere*, 16(6), 733. <https://doi.org/10.3390/atmos16060733>
- 2 Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2023). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (2ª ed.). McGraw-Hill.
- 3 Instituto de Fomento Pesquero. (2021, 16 de junio). *Ameghinomya antiqua* (P. P. King, 1832) – Macrofauna bentónica de Chile. <https://www.ifop.cl/macrafauna/leukoma-antiqua/>
- 4 Li, W., Bai, X., & Pan, Z. (2025). Air pollution and its impact on stone heritage sites: Mechanisms and mathematical models. *npj Heritage Science*, 13, 247. <https://doi.org/10.1038/s40494-025-01820-w>
- 5 Livingston, R. A. (2016). Acid rain attack on outdoor sculpture in perspective. *Atmospheric Environment*, 146, 332–345. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.029>
- 6 O'Neil, M. J. (Ed.). (2013). *The Merck Index: An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals* (15th ed.). Royal Society of Chemistry.
- 7 Toro, R. A., Claramunt, T. A., González, F. V., Ávila, S. G., & Leiva-Guzmán, M. A. (2024). Long-term assessment and acute air pollution events in a mega-industrial area in Central Chile. *Urban Climate*, 55, 101880. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101880>
- 8 Yuan, D.-F., Liu, Y., Trabalski, T., Zhang, Y.-R., Li, J., Francisco, J. S., Guo, H., & Wang, L.-S. (2024). Probing the dynamics and bottleneck of the key atmospheric SO_2 oxidation reaction by the hydroxyl radical. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(6), e2314819121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2314819121>
- 9 Zhang, Y., Li, J., Tan, J., Li, W., Singh, B. P., Yang, X., Bolan, N., Chen, X., Xu, S., Bao, Y., Lv, D., Peng, A., Zhou, Y., & Wang, H. (2023). An overview of the direct and indirect effects of acid rain on plants: Relationships among acid rain, soil, microorganisms, and plants. *Science of the Total Environment*, 873, 162388. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162388>