

## Potencia de la erupción del volcán Puyehue como un problema de Fermi<sup>1</sup>

Hernán Asorey<sup>1</sup> - Arturo López Dávalos<sup>1</sup> - Andrea Clúa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Río Negro, CNEA, CONICET

<sup>2</sup>Alumna del Profesorado en Física, Universidad Nacional de Río Negro  
arturolopezdavalos@yahoo.com.ar

*Los docentes de la escuela media encuentran dificultades para interesar a los alumnos en la ciencia. Una ayuda en este sentido consiste en que, en la etapa de formación, se llame la atención de los futuros docentes sobre la base científica de fenómenos que observamos en nuestra vida diaria. En un primer curso común a los Profesorados en Física y en Química de la Universidad Nacional de Río Negro frecuentemente se plantea problemas de ese tipo, que a veces pueden resolverse usando el concepto de "problema de Fermi", como un método que ayuda a agudizar la imaginación y la capacidad de observación y como un entrenamiento en el razonamiento lógico. La erupción del volcán Puyehue-Cordón Caulle del 4/06/2011 afectó la vida diaria de miles de habitantes norpatagónicos. Por ello encaramos junto a los alumnos, la estimación de la potencia del volcán en su primera erupción, como un problema de Fermi. Dado que utilizamos datos disponibles en Internet y conocimientos al alcance de los alumnos de la escuela media y del primer año universitario, el método puede ser aprovechado por los docentes de esos niveles y extendido a otras situaciones.*

**Palabras clave:** Problema de Fermi, erupción, volcán, potencia.

*Secondary school teachers find it difficult to interest students in science. A help in this regard is that, training teachers' attention is directed to the scientific study of phenomena we observe in our daily lives. In a first course common to Professorate in Physics and Chemistry of the Universidad Nacional de Río Negro frequently are proposed such problems, which sometimes may be solved using the concept of "Fermi problem" as a method that helps sharpen imagination and ability of observation and as a training in logical reasoning. Thus we developed with students, the estimation of the power of the volcano Puyehue-Cordon Caulle first eruption, as a Fermi problem. Since we use data available on the Internet and knowledge available to students in secondary-level and university basics, this method can be used by teachers of those levels and extended to other situations.*

**Keywords:** Fermi problem, eruption, volcano, power.

### Introducción

Es conocida la dificultad que encuentra un docente de Física de la escuela media para despertar el interés de los alumnos por la ciencia, compitiendo con la información que llega a través de Internet y otros medios de comunicación, información generalmente difundida de manera acrítica y que no lleva una invitación a razonar. Una acción que puede ayudar a los futuros docentes en este sentido consiste en que, en la etapa de formación, se les llame la

atención sobre los fundamentos científicos de los fenómenos que observamos en nuestra vida diaria. En el primer curso de Física de la carrera de Profesorado de la Universidad Nacional de Río Negro frecuentemente se plantea a los alumnos problemas de la vida diaria, que a veces pueden resolverse usando el concepto de "problema de Fermi". Pensamos que este es un buen método que ayuda a agudizar la imaginación y la capacidad de observación y también resulta un entrenamiento en el razonamiento lógico (Paenza, 2011).

<sup>1</sup> Propuesta presentada en la XVII Reunión Nacional de Educación en Física. Villa Giardino, Córdoba, octubre de 2011.

El nombre se origina en la habilidad del conocido físico italiano Enrico Fermi (Fermi, 1956; Segré, 1970), quien era famoso por su maestría para realizar estimaciones aproximadas que daban información confiable, a partir de algunos datos que para muchos podrían resultar insuficientes. Uno de los ejemplos de esta habilidad es la estimación que hizo de la potencia de la primera bomba atómica detonada en Nueva México, midiendo la distancia recorrida por unos recortes de papel que dejó caer mientras participaba como observador de esa explosión (Jungk, 1959). Tiempo después, cuando se desempeñaba como profesor en la Universidad de Chicago, Fermi solía plantear ese tipo de problemas a sus alumnos, como un método de enseñanza. El más conocido consistía en estimar cuántos afinadores de piano había en la ciudad de Chicago, en esa época. Planteando una serie de hipótesis razonables, tales como el número de personas que viven en Chicago, cuántas personas viven en promedio en cada casa, cada cuántas casas hay un piano, con qué frecuencia debe afinarse un piano, cuánto tiempo le lleva a un afinador hacer su trabajo, etc., llevó a sus alumnos a hacer una estimación del número de afinadores de piano, obteniendo un resultado que se comparaba razonablemente bien con los datos que figuraban en las páginas amarillas de la guía de teléfonos.

La erupción del volcán Puyehue-Cordón Caulle ocurrida el día 4 de junio de 2011 convirtió los fenómenos volcánicos en un tema de la vida diaria para miles de habitantes de San Carlos de Bariloche y Villa La Angostura. Por ello nos planteamos la posibilidad de encarar junto a los alumnos, el problema de estimar la potencia desarrollada por el volcán Puyehue-Cordón Caulle en su primera erupción, que cubrió con cenizas y arena Bariloche, Villa La Angostura y sus alrededores, pensando el mismo como un problema de Fermi. Dado que utilizamos datos disponibles al público a través de Internet y conocimientos y conceptos de Física al alcance de los alumnos de la escuela media y del primer año universitario, creemos

que el método puede ser aplicado y aprovechado por los docentes de esos niveles.

### Hipótesis de trabajo

Las hipótesis de trabajo que utilizamos son las siguientes:

1) *Área cubierta por arena y cenizas:* De acuerdo con las fotografías tomadas por el satélite Terra de la NASA el día 05/06/2011 y difundidas por Internet (Internet 1, 2011) y debido a las condiciones del viento de ese día, la nube de arena y ceniza siguió prácticamente una línea recta que corre a lo largo del lago Nahuel Huapi, en dirección oeste-noroeste hacia el sur-sureste. A pesar de que sobre el agua no eran visibles, es claro que las cenizas cubrieron toda el área  $A_{NH}$  del lago. Por ello usamos esa superficie como parámetro para estimar el área afectada y la cantidad de ceniza caída. Como hipótesis de trabajo suponemos que el área cubierta por las cenizas y arena equivale aproximadamente a tres veces el área  $A_{NH}$  (Figura 1).

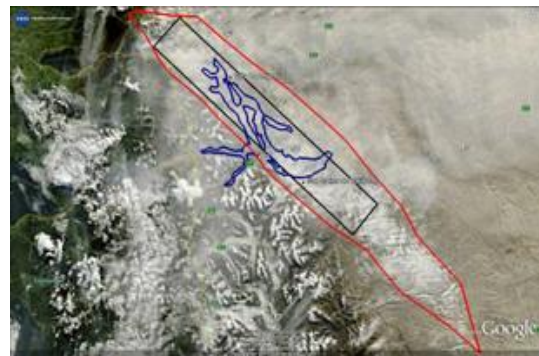


Figura 1. Foto del satélite Terra del día 5/06/2011.

Tomamos como dato la superficie del espejo de agua y le adicionamos las superficies de las islas más grandes, Victoria y Huemul, con lo cual tenemos como área efectiva del lago Nahuel Huapi un total de  $A_{NH} = 571\text{km}^2$ . El

área cubierta por las cenizas sería entonces de  $3 \times 571 \text{ km}^2 = 1713 \times 10^9 \text{ m}^2$ .

En la Figura 1, el contorno rojo encierra al área cubierta con ceniza y arena luego de la erupción; el perfil azul corresponde al contorno del lago Nahuel Huapi; el rectángulo negro marca un área igual a tres veces la superficie del lago.

2) *Espesor de la capa de arena:* Asignamos el valor del espesor promedio de la capa de arena y cenizas en coincidencia con la hipótesis anterior sobre el área cubierta. Se sabe que en Villa La Angostura esa capa alcanzó más de 30cm mientras que al este de Bariloche no llegaba a 5cm. Por otra parte los informes desde Ingeniero Jacobacci indicaban allí una acumulación de más de 10cm, correspondientes a ceniza y arena que no cayó en la zona del Lago Nahuel Huapi, pero que debe ser incluida en el cómputo pues su elevación afecta el balance energético. Como una forma de incluir la contribución de ese material, como también el caído en Chile tomamos una altura promedio de  $e=10\text{cm}$ , cubriendo toda el área que postulamos. Dicho en términos coloquiales, esa sería la altura alcanzada por la capa si “barriéramos” la zona afectada y pusiéramos toda la arena y cenizas en un área de  $1700\text{km}^2$ .

3) *Tiempo estimado de duración de la actividad eruptiva del volcán:* La caída de cenizas en Bariloche comenzó a las 16:30hs y finalizó a las 21:30hs por lo que tomamos un tiempo  $t=5\text{hs}$ .

4) *Altura alcanzada por la nube:* La altura que interesa es la diferencia  $\Delta h=h-h_0$  donde  $h_0=2000\text{m}$  es la altura de la boca del volcán. Hemos tomado  $\Delta h=5000\text{m}$ , un valor promedio ya que distintas componentes de la columna alcanzaron diferentes alturas. Hay fotografías tomadas desde aviones que indican que las más livianas llegaron hasta los  $12000\text{m}$ .

5) *Densidad de la mezcla de arena y cenizas:* La densidad de la arena y ceniza caída en Bariloche fue determinada utilizando elemen-

tos de uso doméstico: una jarra de las usadas para medir cantidades de harina o azúcar y una balanza. El resultado fue  $\rho=600\text{kg/m}^3$ . Este valor, menor que la densidad del agua, se explica por el contenido de ceniza y piedra pómez -que flota en el agua- mezclado con componentes más densas que tienden a hundirse en el agua.

**Resultados**

*Volumen total de la arena caída*

$$V = A \times e = 3 \times 5,71 \times 10^8 \text{ m}^2 \times 0,1\text{m} = 1,713 \times 10^8 \text{ m}^3$$

Considerando que un camión de transporte de áridos puede cargar unos  $7\text{m}^3$ , la arena caída equivale a:

$$V_{\text{arena}}/V_{\text{camión}} = 1,713 \times 10^8 \text{ m}^3 / 7\text{m}^3 = 2,451 \times 10^7 \text{ camiones}$$

Esto significa más de 24 millones de camiones. Otra manera de visualizar la cantidad de arena caída consiste en calcular la altura que alcanzaría si se depositara en una superficie  $A_b = L^2$  de lado  $L$  apilándola en forma de pirámide de altura  $H$ . El volumen de la pirámide  $V=A_b \times H/3=L^2 \times H/3=(1/6)L^3 \text{ tg}(\alpha)$  donde  $\alpha$  es el ángulo de inclinación de la pirámide, debe coincidir con el volumen calculado. Sin embargo, como  $\alpha$  no debe superar el "ángulo de talud" de la arena (Internet 2, 1980), que es de aproximadamente  $40^\circ$ , existe un vínculo entre la altura  $H$  y la base  $L$ . Tenemos las relaciones:

$$L = (6V/\text{tg } \alpha)^{1/3}$$

$$H = L/2\text{tg } \alpha$$

con  $\text{tg } \alpha = 0,8391$ .

Calculando para el volumen de arena y cenizas dado más arriba, se obtiene para las dimensiones de la pirámide:

$$L = 1070\text{m}$$

$$H = 448,92\text{m}$$

Esto es, la arena caída se podría acumular en un terreno de  $1000\text{m}$  de lado ( $100\text{ha}$ ), formando una pirámide de  $448,92\text{m}$  de altura. Como referencia visual podemos decir que la superficie del emergente visible de la Isla Huelmo es de unas  $90\text{ha}$ , y su altura de alrededor de  $80\text{m}$ , bastante menor que los  $450\text{m}$  que obtuvimos aquí.

#### *Masa de la arena y cenizas caídas*

Para determinar la masa de la arena caída, multiplicamos el volumen calculado por la densidad medida, y obtenemos la cantidad:

$$m_{\text{arena}} = 1,03 \times 10^{11} \text{kg} = 1,03 \times 10^2 \times 10^6 \text{ton}$$

Un poco más de 100 millones de toneladas.

#### *Energía liberada*

La energía necesaria para elevar esa masa de arena a  $5000\text{m}$  se puede estimar a partir de la energía potencial que alcanza cuando llega a su altura máxima,  $E = mg \Delta h$ . Luego, tenemos:

$$E_{\text{Puyehue}} = mg \Delta h = 1,03 \times 10^{11} \times 9,8 \times 5 \times 10^3 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$$

$$= 5,04 \times 10^{15} \text{J} = 1,2 \times 10^3 \text{kt}$$

Es decir, más de mil kilotones.

#### *Equivalente en bombas atómicas*

La energía que acabamos de calcular se puede comparar con la energía liberada por la bomba atómica de Hiroshima, que fue  $E_H = 75 \text{TJ} = 75 \times 10^{12} \text{J} = 18 \text{kt}$  (Internet 5, 2011), es decir 18 kilotones.

La razón entre ambas cantidades es:

$$E_{\text{Puyehue}} / E_H = 67,15$$

En conclusión, el primer día de erupción el Volcán Puyehue-Cordón Caulle liberó una

energía equivalente a unas 70 bombas atómicas como la de Hiroshima. A manera de comparación podemos mencionar que el terremoto de Japón de 2011, de una magnitud de 8,9 grados en la escala de Richter, liberó una energía equivalente a 10000 bombas de Hiroshima.

#### *Velocidad de salida*

El magma asciende por el conducto del volcán mezclado con los vapores de la roca fundida y vapor de agua, lo que determina un flujo turbulento de dos fases. La velocidad de salida del magma por el cráter se puede calcular a partir de la ley de conservación de la energía. Despreciando el rozamiento con el aire, la energía cinética del fluido en la boca del cráter debe ser igual a la energía potencial alcanzada en el ascenso final,

$$(1/2)mv^2 = mg \Delta h.$$

De aquí sigue que  $v = (2g \Delta h)^{1/2} = 313,05 \text{m/s}$ , esto es, casi la velocidad del sonido en el aire. Esta elevada velocidad determina el rápido enfriamiento del magma saliente, lo que sumado a su composición en dos fases, explica la estructura amorfa y la presencia de microcristales en el material expulsado, ante la imposibilidad de una cristalización lenta que produciría cristales más grandes. La estimación de la velocidad de salida es muy cruda pero como dato se puede decir que las mediciones de la velocidad de salida del magma en otras erupciones indican que frecuentemente se trata de flujos supersónicos. No hay mediciones de este tipo en el caso del Puyehue-Cordón Caulle.

#### *Potencia*

Si suponemos que la primera erupción duró unas cinco horas, podemos estimar la potencia desarrollada por el volcán, que está dada por:

$$P_{\text{Puyehue}} = E_{\text{Puyehue}} / t =$$

$$= 5,04 \times 10^{15} \text{J} / (1,8 \times 10^4 \text{s}) = 2,8 \times 10^{11} \text{W}$$

Este resultado se puede comparar con la potencia eléctrica instalada en la Argentina, que es de  $23371MW$  (a junio de 2005).

Luego, la proporción resulta:

$$P_{\text{Puyehue}}/P_{\text{Arg}} = 2,8 \times 10^{11}/(23371 \times 10^6) \approx 12$$

La potencia desarrollada por el volcán equivale a 12 veces la potencia eléctrica instalada en la Argentina. También podemos comparar nuestro resultado con la potencia eléctrica instalada mundial, que es de  $1,5 \times 10^{13}W$  (Internet 6, 2011). Una comparación porcentual resulta en:

$$P_{\text{Puy}}/P_{\text{Mund}} = 2,8 \times 10^{11}/1,5 \times 10^{13} \times 100 = 1,9\%$$

La potencia desarrollada por el volcán Puyehue equivale a algo menos del 2% de la potencia eléctrica mundial.

### Comentarios sobre las hipótesis

En el problema de los afinadores de piano era posible comparar el resultado obtenido, 70 afinadores, con los 50 que figuraban en la guía de teléfonos de la época. La discrepancia podría atribuirse al hecho de que algunos afinadores no tuvieran teléfono o no figuraban como tales en la guía, o también a un error en la estimación. Pero este último punto es parte del juego: no se pretende obtener un resultado exacto, sino que sólo se aspira a lograr una aproximación razonable. Entendemos como tal una discrepancia que no supere cierto límite, digamos el 100%.

A continuación haremos un comentario sobre cada una de las hipótesis que utilizamos:

1) *Área cubierta.* En la erupción del 04/06/2011 la ceniza y arena cubrieron un área más extensa que la supuesta en este trabajo. Eso significaría que nuestros cálculos de la energía y la potencia subestiman el verdadero valor. Si pudiéramos contrastar con datos más precisos podríamos mejorar este aspecto, que

es uno de los más inciertos. La compensación que intentamos entre el material caído más allá de la zona considerada y el aumento del espesor en la zona considerada puede no ser suficiente.

2) *Espesor promedio de la capa de arena y ceniza.* Se sabe que en las proximidades del volcán, como también en el Paso Cardenal Samoré y Villa La Angostura la capa de arena y cenizas alcanzó los 30cm, mientras que más hacia el este no superó los 5cm. El espesor hipotético promedio (10cm) fue elegido pensando que si lo caído en distintos lugares se distribuyera de manera uniforme cubriendo un área igual a tres veces el lago Nahuel Huapi (más de 1700 km<sup>2</sup>) se alcanzaría ese valor.

3) *Tiempo de actividad.* La caída de arena y cenizas en Bariloche cesó a las 21,30hs, aproximadamente, es decir que la primera erupción duró cinco horas. Los truenos provocados por las descargas eléctricas duraron un total aproximado de 12 horas indicando que la actividad del volcán continuaba hasta entonces. Esto no afecta la estimación de la energía desarrollada.

4) *Altura alcanzada por la nube.* Los informes del día 4 de junio indicaban una altura de la pluma (plume) de 12000m (snm). Como esa pluma comprendía componentes de distinta densidad, creemos que nuestra suposición de  $\Delta h=5000m$  es razonable.

5) *Densidad de la mezcla de arena y cenizas.* La medición se hizo con una muestra recogida a pocas horas del inicio de la erupción. Muestras tomadas algunos días después dan valores de densidad más elevados, posiblemente debido a que la lluvia disolvió parte de los componentes.

### Conclusión

La solución del problema planteado muestra que con los conocimientos al alcance de los

alumnos de la escuela media, o del primer año de la universidad, e introduciendo una sucesión de hipótesis razonables, es posible resolver de manera aproximada un problema surgido de un evento de la vida diaria. Como hemos utilizado datos disponibles en Internet y conocimientos al alcance de los alumnos creemos que el método puede ser aprovechado por los docentes de esos niveles y extendido a otras situaciones.

Por otra parte una comparación de las cantidades calculadas, con las energías vinculadas a actividades humanas muestra la magnitud de la energía puesta en juego en los fenómenos geológicos.

Para obtener información más precisa sobre la erupción recomendamos leer los informes de los Dres. Adriana Bermúdez y Daniel Delpino en las referencias (Internet 3, 2011) e (Internet 4, 2011).

#### *Comentario*

La expulsión de cenizas por el volcán continuó por varios meses. A fines de 2011 el INTA dio a conocer datos sobre el área afectada en las provincias de Río Negro y Neuquén que supera ampliamente el área cubierta por la erupción explosiva del 4/6/2011. A partir de esos datos se puede extraer información sobre la ceniza caída en el área considerada en este trabajo y la coincidencia es razonable.

#### *Agradecimientos*

Agradecemos los aportes realizados por colegas de la UNRN y del CAB-IB así como el intercambio de correspondencia con Adriana Bermúdez y Daniel Delpino (ambos de UNCOMA-CONICET) que nos aportó valiosas sugerencias.

#### **Referencias**

- Fermi, L. (1956). *Átomos en mi familia en Mi vida con Enrico Fermi*. Madrid: Editorial Marfil, Alcoy.
- Internet 1 (2011). <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/subsets/?subset=Patagonia.2011165.terra.1km>
- Internet 2 (1980). [http://en.wikipedia.org/wiki/Angle\\_of\\_repose](http://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_repose)
- Internet 3 (2011). Primer informe. [http://www.conicet.gov.ar/webfiles/2011/06/ Impacto %20de%20la%20actividad%20del%20Volcan%20Puyehue.pdf](http://www.conicet.gov.ar/webfiles/2011/06/Impacto%20de%20la%20actividad%20del%20Volcan%20Puyehue.pdf)
- Internet 4 (2011). Segundo informe. [http://www.conicet.gov.ar/new\\_noticias/noticias.php?id\\_noticia=7295&tipo=6&nota\\_completa=yes](http://www.conicet.gov.ar/new_noticias/noticias.php?id_noticia=7295&tipo=6&nota_completa=yes)
- Internet 5 (2011) [http://en.wikipedia.org/wiki/Little\\_Boy](http://en.wikipedia.org/wiki/Little_Boy)
- Internet 6 (2011) [http://en.wikipedia.org/wiki/World\\_energy\\_consumption](http://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_consumption)
- Jungk, R. (1959). *Más brillante que mil soles*. Madrid: Editorial Argos Vergara.
- Paenza, A. (2007). Problemas de Fermi, *Diario Página12*. Buenos Aires: Editorial Página12.
- Segrè, E. (1970). *Enrico Fermi, Physicist*. Chicago: University of Chicago Press.