



**Comechingonia virtual**  
Revista Electrónica de Arqueología  
Año 2013. Número 1: 119-153  
[www.comechingonia.com](http://www.comechingonia.com)

---

## **MODELADO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN DE LA FENOMENOLOGÍA FÍSICA EN LOS NIÑOS DE LLULLAILLACO<sup>1</sup>.**

Recibido el 25 de Octubre de 2012. Aceptado el 4 de Marzo de 2013.

**Alejandro R. Lespinard<sup>2,3</sup>, Mario Bernaski<sup>4</sup>, Gabriela Recagno<sup>4</sup>, Rodolfo H. Mascheroni<sup>2,5</sup>**

<sup>2</sup>Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), CONICET La Plata - Universidad Nacional de La Plata, 47 y 116, (B1900AJJ), La Plata, Argentina, [alespinard@cidca.org.ar](mailto:alespinard@cidca.org.ar), <http://www.cidca.org.ar>

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina, <http://www.agro.unlp.edu.ar>

<sup>4</sup>Museo de Arqueología de Alta Montaña, Gobierno de la Provincia de Salta, Salta, Argentina, <http://maam.culturasalta.gov.ar>

<sup>5</sup>MODIAL – Depto. Ing. Química – Facultad de Ingeniería, UNLP, La Plata, Argentina.

### **Resumen**

*En marzo de 1999 se produjo uno de los descubrimientos más importantes en el campo de la arqueología de alta montaña: el hallazgo de tres cuerpos de niños, con alto grado de conservación, pertenecientes a la filiación Incaica. Los cuerpos fueron hallados cubiertos por un manto compuesto de roca y hielo en la cumbre del volcán Llullaillaco ubicado en la provincia de Salta a más de 6700 m sobre el nivel del mar. Actualmente las momias se encuentran en el Museo de Arqueología de Alta Montaña de Salta y una de las principales tareas que se están llevando a cabo es establecer condiciones óptimas de preservación de los mismos. Con este fin resulta relevante determinar los fenómenos físicos y químicos que ocurrieron, ocurren y pueden ocurrir en los cuerpos de los Niños del Llullaillaco. En este trabajo se desarrolló un modelo matemático que describe los procesos de transferencia de calor y materia en los cuerpos para los diferentes estadios y condiciones a las cuales se han encontrado expuestas dichas momias. La*

*resolución numérica de los modelos permitió entender e interpretar la dinámica física en dichos cuerpos, con el objetivo final de visualizar y establecer políticas de preservación.*

**Palabras clave:** *Momias, Llullaillaco, Transferencia de Calor y Masa, Preservación.*

### **Abstract**

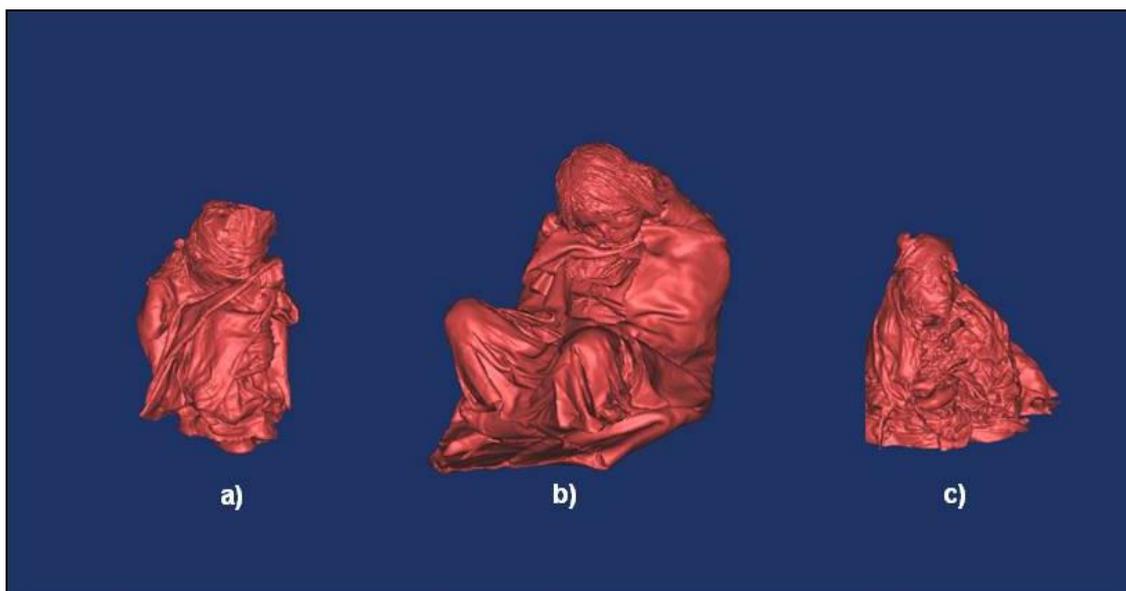
*In March 1999 there was one of the most important discoveries in the field of high mountain archeology: the discovery of three bodies of Inca children with high degree of conservation preservation. The bodies were found covered by a layer composed of rock and ice at the top of the volcano Llullaillaco located in the province of Salta at more than 6700 m above sea level. Currently the mummies are in the Museum of High Mountain Archeology in Salta and one of the main tasks being carried out is to establish optimal conditions for their preservation. To this end it is important to determine the physical and chemical phenomena that have occurred, occur and may occur in the bodies of the Children of Llullaillaco. In this work we developed a mathematical model that describes the processes of heat and mass transfer in bodies for the different stages and conditions to which these mummies have been exposed. The numerical resolution of the models allowed understand and interpret the physical dynamics in these bodies, with the ultimate goal of visualize and establish preservation policies.*

**Keywords:** *Mummies, Llullaillaco, Heat and Mass Transfer, Preservation.*

### **Introducción**

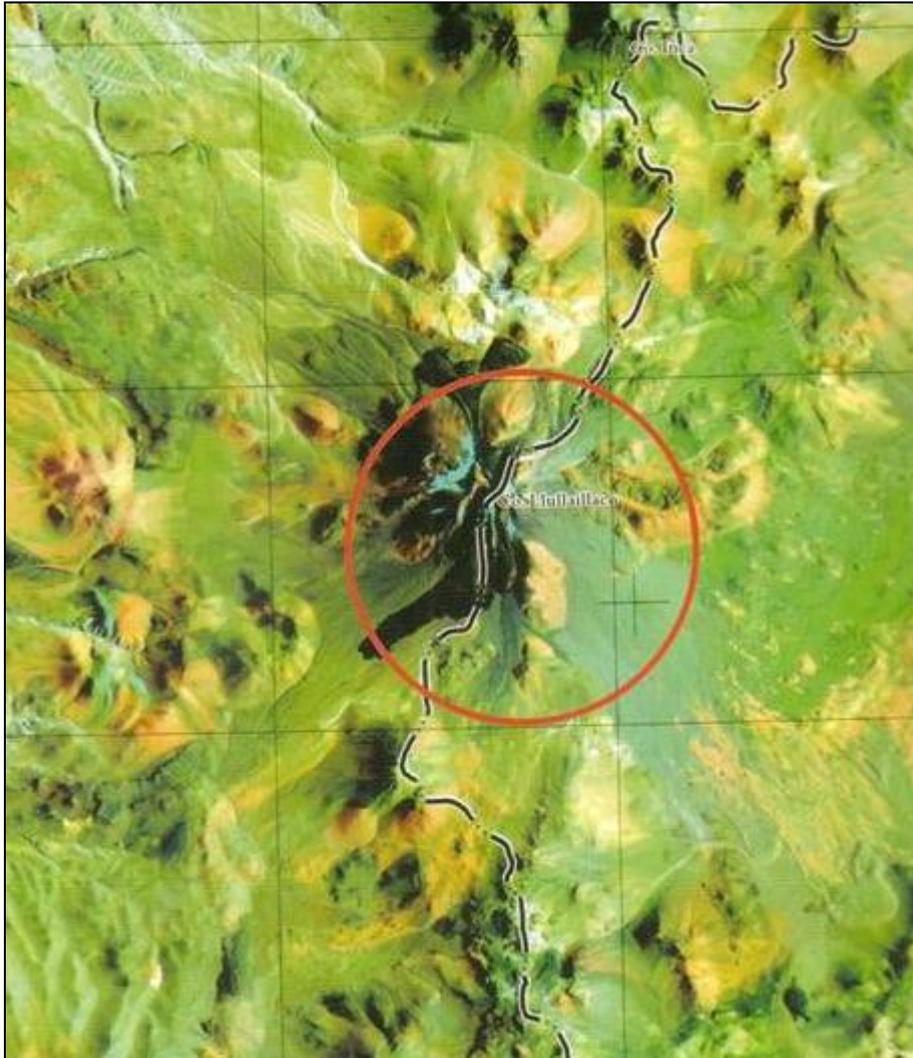
En marzo de 1999 se produjo uno de los descubrimientos más importantes en el campo de la arqueología de alta montaña: el hallazgo de tres cuerpos de niños, con alto grado de conservación, pertenecientes a la filiación Incaica (Vitry 2001).

En la actualidad estos cuerpos congelados de más de 500 años de antigüedad son conocidos como Los Niños del Llullaillaco (Reinhard 1999). Se trata de dos niñas, la mayor conocida como La Doncella y la menor como La Niña del Rayo, a raíz de la caída de un rayo en algún momento de su enterratorio y un varón, el cual es apodado El Niño (ver Figura 1).



*Figura 1. Imágenes de los Niños del Llullaillaco a) Niño, b) Doncella y c) Niña del rayo.*

Los cuerpos de los niños fueron hallados, en la cumbre del Volcán Llullaillaco ubicado a 12° 43' Latitud Sur y 68° 32' Longitud Oeste, en el Departamento Los Andes, Provincia de Salta; República Argentina (Reinhard y Cerruti 2000) (ver Figura 2). El mismo se eleva 6.739 metros sobre el nivel del mar, lo que lo convierte en una de las principales montañas de la cordillera de los Andes y en uno de los volcanes más altos del mundo. Los cuerpos se encontraron cubiertos por un domo-casquete de hielo, mecánica y térmicamente cortado, rodeados por una capa aislante, antiséptica y absorbente de piedra volcánica y ceniza (Vigl 2005). Se estima que las condiciones ambientales que favorecieron el proceso de momificación natural y por consiguiente su conservación fueron: las bajas temperaturas en forma constante (-18°C), la baja presión atmosférica, el bajo nivel de oxígeno y la no incidencia de luz solar (Catálogo del Museo de Arqueología de Alta montaña 2009).



*Figura 2. Localización del volcán Llullaillaco en el límite internacional entre Argentina y Chile. Escala 1:250.000. Fuente: Catálogo del Museo de Arqueología de Alta montaña.*

Luego del descubrimiento los Niños de Llullaillaco pasaron tres semanas en dos freezer de la dependencia militar Fragata Libertad, pero debido al espacio insuficiente en los congeladores para las tres momias y los artefactos, y a la falta de estructura para la investigación, se autorizó su traslado a la Universidad Católica de Salta donde se contaba con tres salas para el trabajo de laboratorio y de almacenamiento, y varios congeladores disponibles. En este lugar permanecieron

hasta 2004, fecha en que se creó el Museo de Arqueología de Alta Montaña de Salta (MAAM), institución destinada a su guarda definitiva.

Actualmente las momias se encuentran en el MAAM y una de las principales tareas que se están llevando a cabo es establecer las condiciones óptimas de preservación de los mismos. En este sentido un factor esencial para la preservación artificial exitosa de una momia en el almacenamiento frío es el control y mantenimiento de su peso. Con este fin resulta relevante determinar y analizar los fenómenos físicos que se desarrollan en las mismas.

En base a lo anterior se proponen como objetivos de este trabajo a) desarrollar un modelo matemático que describa los fenómenos de transferencia de calor y materia para cada período; b) identificar cuáles fueron los factores ambientales que propiciaron la conservación de los cuerpos, con vistas a establecer condiciones óptimas de preservación en cuanto al peso de las momias.

### **Descripción de los fenómenos físicos**

Desde el punto de vista físico, los cuerpos, pueden ser considerados como una combinación de una matriz sólida, una fase líquida (solución acuosa) y una fase gaseosa (aire y vapor de agua). El agua en las momias se puede encontrar en distintos estados: como hielo, solución acuosa y/o vapor de agua. En el caso del agua líquida, puede estar libre o ligada. Para la descripción del proceso de congelación el cuerpo puede ser dividido en tres zonas: no-congelada, congelada y porosa parcialmente deshidratada como puede observarse en la Figura 3.

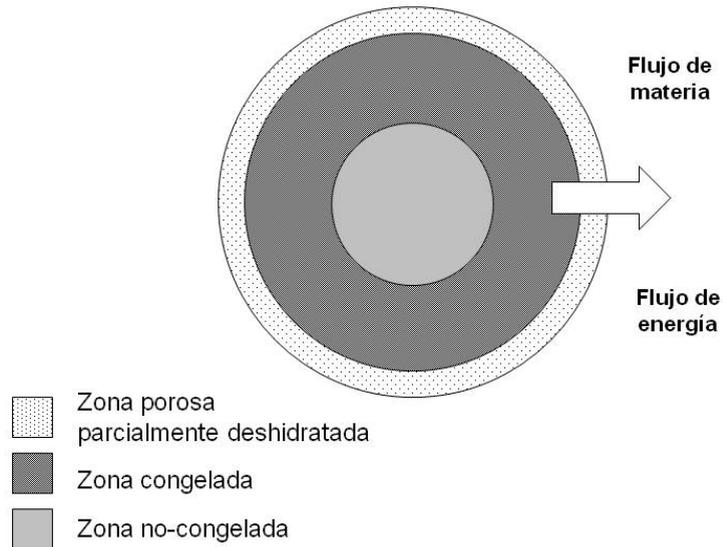


Figura 3. Esquema de las diferentes zonas del cuerpo y su relación con el ambiente.

Los fenómenos que se deben considerar en el modelo matemático a desarrollar son la transferencia de calor y materia entre el cuerpo y el medio que lo rodea, y los siguientes cambios de estado: congelación del agua líquida libre y sublimación del hielo superficial. Durante el fenómeno de sublimación del hielo superficial se produce una transferencia de vapor de la zona congelada al medio ambiente, generando la formación de una capa deshidratada superficial. De esta manera el frente de sublimación va desplazándose hacia el interior del cuerpo, aumentando el espesor de la capa deshidratada. El movimiento del vapor a través de esta capa puede ser considerado difusivo, y es debido a la diferencia de presiones de vapor entre la superficie del hielo y el seno del aire del medio ambiente. Así la determinación del flujo de agua permite estimar la pérdida de peso producida por evaporación o bien la ganancia de peso producida por condensación, siendo esto esencial a los fines de identificar los factores que

propiciaron la conservación de los cuerpos o bien establecer condiciones óptimas de preservación de los mismos en cuanto a sus pesos.

Consecuentemente con lo mencionado anteriormente, en este trabajo se plantean modelos matemáticos que permiten determinar dichos flujos de agua y la variación de los pesos teniendo en cuenta las condiciones ambientales que caracterizan a cada período. Además para cada período en particular se formuló el modelo y se seleccionaron los parámetros a determinar en función de los datos disponibles y de las variables que se consideran de interés determinar y analizar en cada uno de ellos. Con respecto a ello se exponen en la tabla 1, a modo resumen, los datos disponibles, las características distintivas y los parámetros a determinar para cada uno de los períodos.

		Periodo	Datos disponibles	Características distintivas	Parámetros a determinar
Cumbre del volcán Lullailaco (CL)		hasta 03/1999 (aproximadamente 500 años)	-T y H del ambiente estimadas (registro de 2005). -Pérdidas estimadas de peso de los cuerpos. -Profundidad de los cuerpos.	-Inicio de la congelación de los cuerpos. -Presencia de lecho rocoso sobre los cuerpos. -Altitud (6700 m).	-Coeficiente de transferencia de calor y materia. -Evolución del peso. -Evolución de capa deshidratada. -Distribución de temperatura en los cuerpos.
Freezer (FUCS)	Universidad Católica de Salta	03/1999 – 08/2004	-T y H del ambiente. -Evolución del peso de los cuerpos.	-Rehidratación de los cuerpos. -Embolsado al vacío.	-Coeficiente de transferencia de calor y materia. -Evolución de capa deshidratada. -Incidencia de las fluctuaciones de temperatura sobre el peso de los cuerpos.
	MAAM	08/2004 - 07/2007			
Cápsulas del MAAM (CMAAM)		07/2007 hasta la actualidad	-T y H del ambiente. -Peso de los cuerpos.	-Condiciones ambientales estables y estrictamente controladas. -Aplicación de sobre presión. -Control del peso de los cuerpos (constantes).	- Establecer las condiciones ambientales para la óptima conservación de las momias en cuanto a sus pesos.

Tabla 1. Datos disponibles, características distintivas y parámetros a determinar para cada uno de los períodos.

Como se observa en dicha tabla los datos disponibles para el período en que los cuerpos se encontraban en la cima del volcán Lullailaco son: la temperatura y humedad media (obtenida de un registro de 2005), las

profundidades a las cuales se encontraban enterrados los cuerpos y una estimación de las pérdidas de pesos de los cuerpos realizada en un trabajo previo por Vigl (2005). A diferencia de los dos períodos siguientes en este los cuerpos de los niños estaban cubiertos por un lecho rocoso y ubicados a más de 6700 m sobre el nivel del mar. Por tal motivo resulta importante determinar la incidencia de estos factores ambientales sobre la transferencia de calor y materia en los cuerpos. Por otro lado en esta etapa se inicia el congelamiento de los cuerpos y con ello el cambio de fase del agua presente en los mismos, por lo que la estimación del tiempo de congelación es en efecto necesaria para incorporar o no dicho cambio de estado en el modelo matemático. Así mismo se comienza a producir el fenómeno de deshidratación en las momias con la consecuente generación de la capa deshidratada, con lo que la evolución de esta última y del peso son parámetros importantes a determinar ya que además establecen las condiciones de inicio del período siguiente. Finalmente la simulación computacional de la distribución de temperaturas al inicio de este período resulta relevante para identificar las partes del cuerpo más susceptibles a los cambios de temperatura.

En la etapa posterior a su descubrimiento donde las momias fueron colocadas en freezer se realizaron mediciones periódicas del peso, como así también de las condiciones de temperatura y humedad. Una característica distintiva que se produjo en dicho lapso de tiempo fue el incremento de peso de los cuerpos debido a su rehidratación, el cual se detuvo luego del embolsado al vacío de los mismos. Las variables importantes a determinar en este caso fueron el espesor de la capa deshidrata, como también la incidencia de las fluctuaciones de la temperatura de los freezer sobre la misma.

Hasta aquí debe destacarse que las simulaciones de la historia previa (en la cumbre y en la Universidad Católica de Salta) fueron limitadas a la pobre información experimental correspondiente a dichos períodos, debiéndose realizar numerosas suposiciones – razonables – pero que limitan el detalle y la validez de los resultados.

Finalmente en el MAAM todas las variables se encuentran estrictamente controladas por sistemas de monitoreo y se ha logrado mantener en forma constante el peso de las momias. Por lo que para este período no resulta de interés realizar la predicción del peso como el espesor de la capa deshidratada, ya que dichos parámetros se han mantenido constantes. No obstante el modelo matemático se empleará para estimar las condiciones óptimas de preservación en

cuanto a su peso y predecir que fenómenos físicos se producirán en función de las condiciones ambientales a las cuales son expuestos los cuerpos.

## Desarrollo e Implementación del Modelo de Simulación

### Modelado matemático

Se propone el siguiente modelo matemático general para los tres estadios (Cumbre del Llullaillaco (*CL*), Freezer de Universidad Católica de Salta (*FUCS*), Cápsula Museo de Arqueología de Alta Montaña (*CMAAM*)), el cual permite describir los fenómenos físicos que ocurrieron, ocurren y pueden ocurrir en los tres cuerpos de las momias en cuanto a los procesos de transferencia de calor y materia. Este modelo supone las siguientes consideraciones principales: a) dentro del cuerpo la transferencia de energía es sólo por conducción (Ley de Fourier), b) en la superficie del cuerpo se considera la transferencia de energía por convección y radiación; y además las pérdidas o ganancias de energía asociadas a la evaporación (sublimación) o condensación superficial del agua, respectivamente y c) el modelo no considera transporte interno de agua, se asume que en todo momento el frente de sublimación se mantiene en la superficie del cuerpo.

De esta manera el balance de energía queda descrito por la ecuación (1), con la condición inicial y las de contorno dadas por las ecuaciones 2 y 3, respectivamente.

$$\rho cp \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (1)$$

Condiciones iniciales:

$$T = T(x, y, z, 0) \quad (2)$$

Condiciones de contorno:

$$-nk \nabla T = h(T_{\text{sup}} - T_a) + \sigma \varepsilon (T_{\text{sup}}^4 - T_a^4) + L_s N \quad (3)$$

donde  $n$  es el vector normal a la superficie,  $h$  el coeficiente de transferencia de calor,  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann,  $\varepsilon$  emisividad,  $L_s$  calor de sublimación

del hielo,  $T_{sup}$  y  $T_a$  son las temperaturas de la superficie de los cuerpos y el ambiente que los rodea, respectivamente. Las condiciones de contorno (temperatura y humedad relativa del ambiente) empleadas en este modelo corresponden a las determinadas mediante un registro realizado en el sitio del hallazgo a 80 cm de profundidad durante el período de un año y medio.

Por su parte,  $N$  es el flujo de agua evaporada en la superficie por unidad de área y puede determinarse a través de la siguiente expresión:

$$N = k_g (a_w P_{sat}(T_{sup}) - HR P_{sat}(T_a)) \quad (4)$$

donde  $k_g$  es el coeficiente de transferencia de materia,  $a_w$  la actividad de agua,  $P_{sat}$  la presión de saturación del vapor de agua,  $HR$  la humedad relativa del ambiente.

A su vez, la actividad del agua ( $a_w$ ) puede evaluarse mediante la ecuación 5:

$$a_w = \frac{P_{hielo}}{P_{sw}^0} \quad (5)$$

donde  $P_{hielo}$  es la presión del vapor del hielo y  $P_{sw}^0$  es la presión del agua superenfriada a la misma temperatura.

Para estimar la pérdida de peso producida por evaporación o la ganancia de peso producida por condensación a un determinado tiempo  $PP(t)$  (kg) se calcula la integral del flujo de agua  $N$  en la frontera del dominio  $\Gamma$  y en el tiempo:

$$PP(t) = \int_0^t \left[ \int_{\Gamma} N(\Gamma, t) d\Gamma \right] dt \quad (6)$$

Las pérdidas por evaporación se usaron para determinar un contenido de agua medio  $\bar{C}$  (base seca) el cual es empleado a su vez para determinar las propiedades físicas.

$$\frac{d\bar{C}}{dt} = \frac{1}{m_{ss}} \int_{\Gamma} N(\Gamma, t) d\Gamma \quad (7)$$

siendo  $m_{ss}$  la masa de sólido seco; a partir de ésta se obtiene el contenido de agua medio en base húmeda, para cada tiempo, usado para evaluar las propiedades físicas:

$$x_w(t) = \frac{\bar{C}(t)}{\bar{C}(t)+1} \quad (8)$$

A partir del parámetro anterior se calculó la fracción volumétrica del agua mediante la siguiente expresión:

$$\phi_{agua} = \frac{x_w \rho}{\rho_{agua}} \quad (9)$$

Para evaluar las propiedades físicas de las momias en función de la temperatura y el contenido de agua se consideraron ecuaciones establecidas por diferentes autores para congelación de carnes.

Conductividad térmica:

$$k = 1,745(1 - TCR/T)\phi_{agua} + 0.233 \quad (\text{Fikiin 1974}) \quad (10)$$

Capacidad calorífica:

$$Cp = 3874 - 2534\phi_{agua} + 902893(1 - \phi_{agua})/T^2 \quad (\text{Mascheroni 1977}) \quad (11)$$

Presión de vapor del hielo:

$$P_{hielo} = \exp(9.550426 - 5723.265/(T + 273.16) + 3.53068 \ln(T + 273.16) - 0.00728322(T + 273.16)) \quad (\text{Murphy y Koop 2005}) \quad (12)$$

Presión de saturación de vapor de agua:

$$P_{sat} = \exp(23.4795 - 3990.5/(T + 233.833)) \quad (13)$$

(Ecuación de Antoine) (Chuntranuluck et al. 1998).

Por su parte la densidad fue calculada a partir de los pesos iniciales estimados de los Niños, sus volúmenes y las pérdidas de peso ( $PP(t)$ ).

Para la resolución numérica del modelo previamente planteado se utilizó el software COMSOL™ Multiphysics (COMSOL AB). El software utilizado emplea el método de elementos finitos para la resolución de las ecuaciones diferenciales propuestas en el modelo. Para ello aplica un esquema de integración implícito con paso de tiempo variable, combinado con el método de Newton para resolver el sistema de ecuaciones no lineales resultantes.

### **Reconstrucción de las geometrías tridimensionales de los cuerpos**

Para obtener el dominio del modelo de simulación se debieron obtener las geometrías tridimensionales de los cuerpos sin sus vestimentas.

Las mismas fueron reconstruidas a partir de tomografías computadas (TC) realizadas por medio de un equipo no helicoidal (Tomoscan M/EG, Philips, Holanda) en Tomografía Computada Sociedad del Estado de la ciudad de Salta. Los cortes tomográficos se obtuvieron con un espesor de 5 mm, empleándose para ello un voltaje de 120 Kv con 40 mA y un tiempo de corte de 2 seg. Por su parte, las imágenes de los cortes axiales correspondientes a las cabezas de las momias se tomaron en forma separada a la del resto del cuerpo y con un field of view (FOV) menor de acuerdo a lo descrito por Previgliano et al. (2005). Los archivos DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) generados por el tomógrafo fueron empleados para la reconstrucción volumétrica de los cuerpos de las momias.

La secuencia de imágenes de las TC fueron procesadas, realizando inicialmente la segmentación de dichas imágenes definiendo para ello valores umbrales en la escala de grises generándose así una máscara (color roja). De esta forma se consiguió diferenciar el cuerpo de otros objetos presentes en las imágenes como ser camilla del tomógrafo, vestimentas, adornos en la cabeza (ver Figura 4a, b, c, correspondiente a la geometría del Niño). Esto permitió la edición manual de la máscara y la eliminación de dichos objetos, los cuales son innecesarios en el modelo de simulación. Luego se realizó la reconstrucción volumétrica de las momias optimizando los parámetros de manera de obtener un cuerpo tridimensional lo más representativo posible de la realidad (Figura 4d).

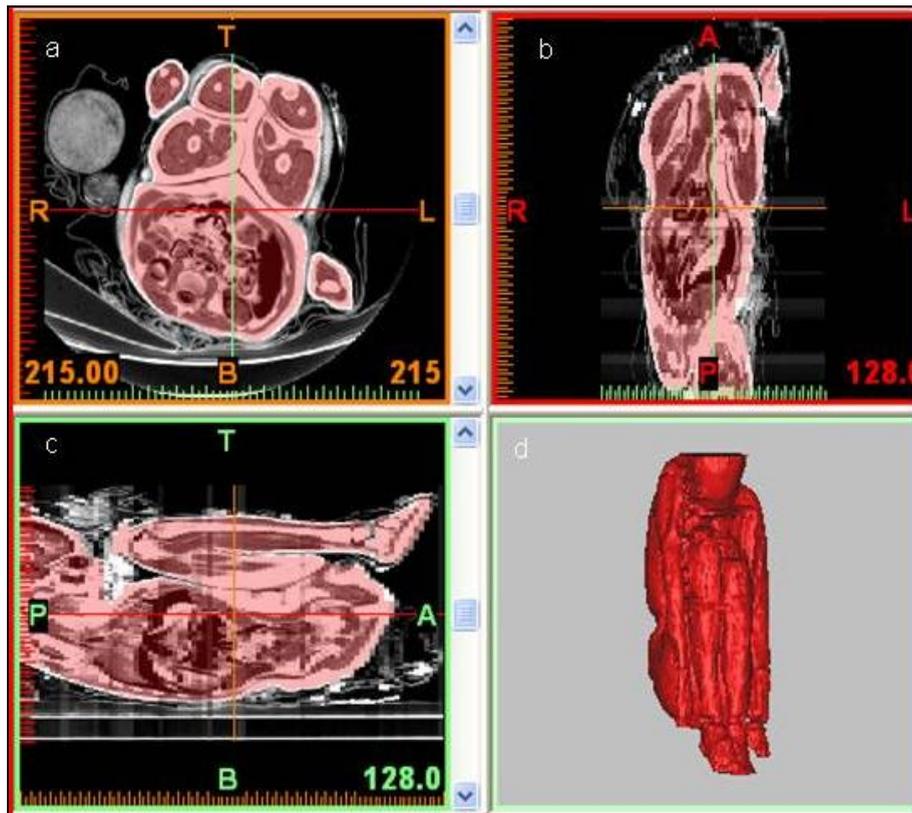


Figura 4. Vistas a) coronal, b) axial, c) sagital mostrando la segmentación y d) reconstrucción volumétrica del Niño.

Además, debido a la falta de algunos cortes tomográficos originales, correspondientes a la Doncella y la Niña del rayo, debieron ser reconstruidas pequeñas partes pertenecientes a los cuerpos de las mismas. Finalmente se ensambló el cráneo al resto del cuerpo y se realizó el escalado correspondiente para obtener el tamaño real del cuerpo (ver Figura 5).

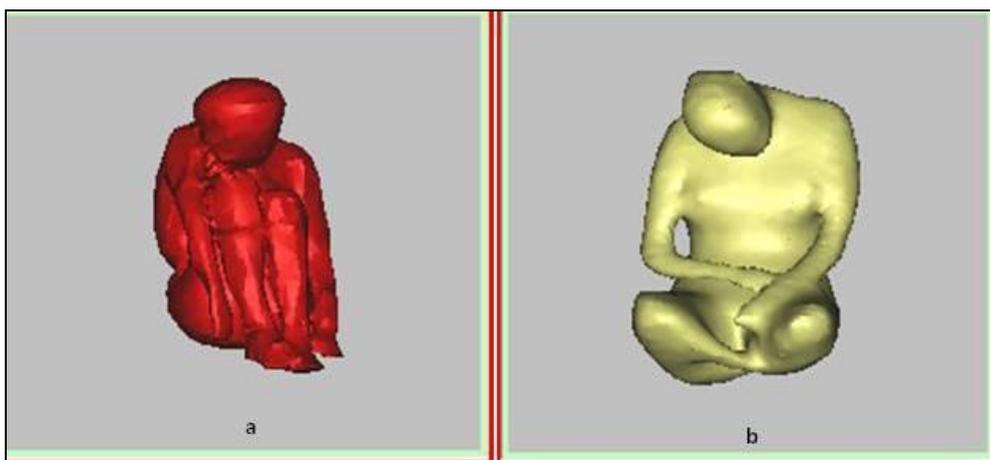


Figura 5. Representación 3D de la geometría del cuerpo a) del Niño y b) de la Doncella, con la adición del cráneo y su escalado correspondiente.

La reconstrucción virtual en 3D de las momias permitió a su vez estimar el volumen y la superficie de los cuerpos los cuales son necesarios para la implementación del modelo de simulación. Los valores obtenidos para ambos parámetros son mostrados en la Tabla 2.

	Volumen (m <sup>3</sup> )	Superficie (m <sup>2</sup> )
NIÑO	0,0195	0,5373
DONCELLA	0,0480	1,0583
NIÑA DEL RAYO	0,0177	0,9851

Tabla 2. Medidas geométricas obtenidas a través de la reconstrucción computacional de los cuerpos.

### Resultados de la aplicación del modelo de simulación

El modelo de simulación general propuesto anteriormente fue modificado y adaptado para cada uno de los tres períodos, considerando las condiciones ambientales a las cuales fueron expuestos los cuerpos en cada uno de ellos. A continuación se detallan las características de cada período y sus correspondientes modelos matemáticos:

## Periodo en la Cumbre del Llullaillaco (CL)

### Condiciones ambientales

Durante aproximadamente 500 años las momias se encontraron en la cumbre del volcán Llullaillaco a unos 6739 metros de altura sobre el nivel del mar y expuestos a una temperatura media anual de  $-12,34^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa media (HR) de 42,59%. Estos valores corresponden al aire, presente en el lecho rocoso, que rodeaba a los cuerpos y fue determinado a 80 cm de profundidad. A su vez los cuerpos estaban distribuidos en la plataforma ceremonial como se muestra en la Figura 6, donde fueron hallados cubiertos por un manto compuesto de roca, arena, cenizas volcánicas e hielo a una profundidad de 1,67; 2,20 y 1,75 m para El Niño, La Doncella y La Niña del Rayo, respectivamente (Reinhard y Cerruti 2000) (ver Figura 6).

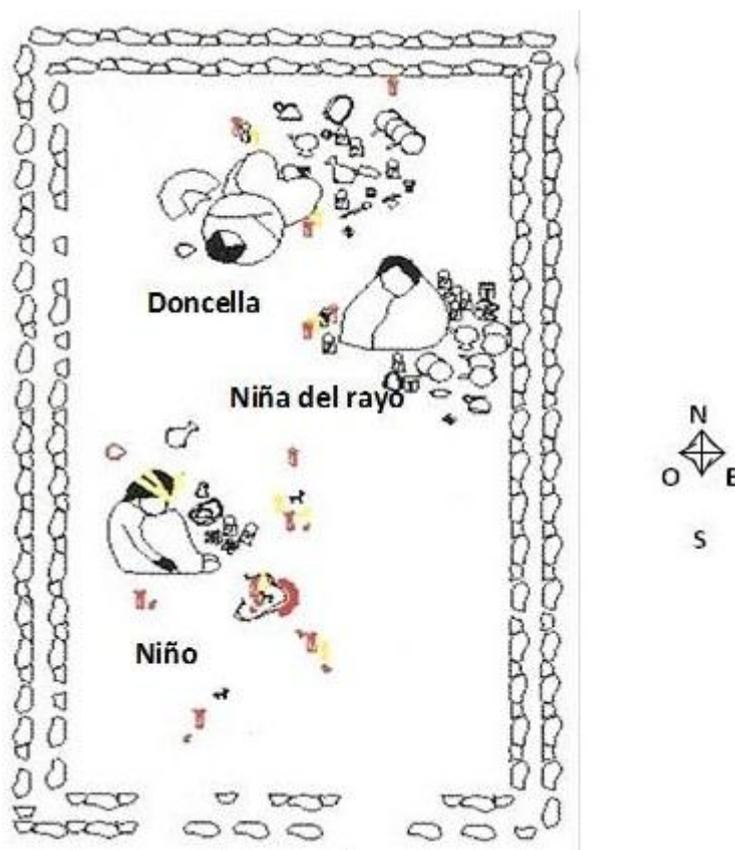


Figura 6. Esquema de la distribución y orientación de las momias en la plataforma ceremonial. Fuente: Catálogo del Museo de Arqueología de Alta montaña.

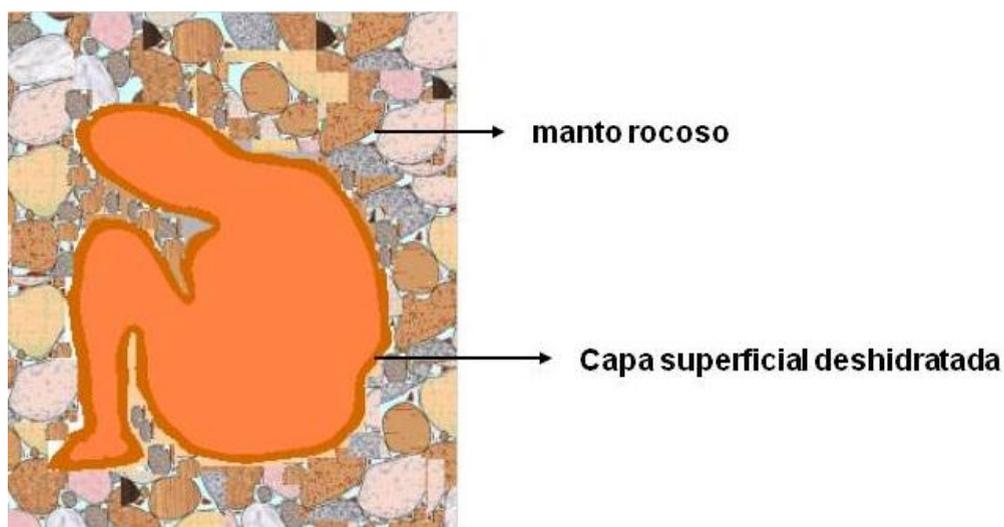


Figura 7. Esquema de la disposición del cuerpo mostrando la capa superficial deshidratada y el manto rocoso que lo cubre.

### Pérdidas de peso de los cuerpos

De acuerdo al Informe de Vigl (2005), el cual toma en cuenta las diferencias raciales, formulario de nutrición, estatura individual y pérdida de agua en las últimas horas de vida, los Niños sufrieron aproximadamente, en los 500 años de su estadio en la Cumbre del Llullaillaco, las pérdidas de peso y las reducciones del contenido de agua de los tejidos que se detallan en la Tabla 3.

	Pérdida de peso total (kg)	Velocidad de pérdida de peso (kg/año)	Reducción contenido de agua en tejidos (%)
NIÑO	8	0.016	54
DONCELLA	5	0.010	35
NIÑA DEL RAYO	2	0.0042	25

Tabla 3. Pérdida de peso y reducción del contenido de agua en los tejidos.

## Consideraciones en la implementación del modelo matemático

En base a las condiciones antes mencionadas se realizan las siguientes consideraciones en la implementación del modelo de simulación para dicho período:

**i)** El agua libre contenida en los cuerpos se encuentra inicialmente en estado sólido (congelada), es decir no se considera el cambio de fase del estado líquido al sólido. Esta simplificación del modelo se realiza teniendo en cuenta que los tiempos que tardaron los cuerpos en llegar a su temperatura de congelación ( $-0,91\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) fueron relativamente muy pequeños (horas) en comparación con el período de 500 años considerado. Para el cálculo de dichos tiempos de congelación se empleó el monograma de Henssge, considerando los siguientes datos:

Peso corporal:

Niño: 18,23 kg.

Doncella: 33,73 kg.

Niña del Rayo: 16,52 kg.

Temperatura ambiente:  $-12,34^{\circ}\text{C}$

Factor de corrección empírico según vestimenta: 1,2

Temperatura de congelación:  $-0,91\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (Riedel 1978) considerando un contenido de humedad inicial de los cuerpos del 75%.

De esta manera se obtuvieron los tiempos, que se detallan a continuación, para alcanzar el punto de congelación en el centro térmico de los cuerpos.

Niño: 10 hs. 48 min.

Doncella: 17 hs. 24 min.

Niña del Rayo: 10 hs. 6 min.

Quedando así demostrada la validez de la primera simplificación (i) del modelo.

**ii)** Se desprecia la resistencia al flujo de vapor de la capa deshidratada. Para demostrar la validez de dicha simplificación se estimó la incidencia de la capa deshidratada sobre el coeficiente de difusión efectivo de agua ( $D_{ef}$ ). Para ello se determinó  $D_{ef}$  mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{D_{ef}} = \frac{e_{cd}}{D_{cd}} + \frac{e_{lr}}{D_{lr}} \quad (14)$$

siendo  $e_{cd}$  y  $D_{cd}$  el espesor y el coeficiente de difusividad de la capa deshidratada, mientras que  $e_{lr}$  y  $D_{lr}$  son los mismos parámetros pero correspondientes al lecho rocoso que cubre los cuerpos.

El parámetro  $D_{lr}$  fue calculado de acuerdo a Taylor y Luthin (1978) quienes proponen la siguiente expresión para estimar la difusividad del agua en suelos en función del contenido volumétrico de agua no congelada (líquida) ( $\theta_u$ ) y del hielo ( $\theta_i$ ):

$$D_{lr} = \frac{1,36 * 10^{-9} * 10^{19,5\theta_u}}{10^{10\theta_i}} \quad (15)$$

El contenido volumétrico de agua líquida ( $\theta_u$ ) fue determinado a través de la “curva característica de suelo-congelación” presentada por Jame y Norum (1980), para suelos de propiedades similares al lecho rocoso, y el valor obtenido fue de 0,025 ( $\theta_i = 0,975$ ).

De esta manera se obtuvo un valor de  $D_{lr}$  de  $7,43 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{s}$ .

El valor de  $e_{lr}$  fue el correspondiente a la profundidad promedio a la cual se encontraban enterrados los cuerpos, siendo de 1,67; 2,20 y 1,75 m para El Niño, La Doncella y La Niña del Rayo, respectivamente.

Por su parte, el valor de  $D_{cd}$  fue estimado a partir de la siguiente ecuación propuesta por Hamdami et al. (2004) para medios porosos:

$$D_{cd} = 1,801 * 10^{-4} * \exp\left(\frac{-23,02}{RT}\right) \quad (16)$$

Obteniéndose un valor de  $D_{cd} = 1,78 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

De la observación de ambos valores ( $D_{cd}$  y  $D_{lr}$ ) y considerando que el espesor de la capa deshidratada porosa ( $e_{cd}$ ) es del orden de  $10^{-3} \text{ m}$ , se deduce la poca incidencia que tiene la misma sobre el valor de  $D_{ef}$ .

De las dos suposiciones planteadas anteriormente el cuerpo puede considerarse como una única zona congelada.

iii) El coeficiente de transferencia de calor entre el cuerpo y el medio que lo rodea debe considerar en este período el material rocoso que cubre los cuerpos. Para esto se calcula un coeficiente de transferencia de calor efectivo ( $U$ ) mediante la siguiente expresión:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{e_{lr}}{k_{lr}} \quad (17)$$

Considerando  $h = 3,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$  según lo estimado por Mall y Eisenmenger (2005) para cuerpos humanos en aire estanco y una conductividad térmica de  $k_{lr} \sim 3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$  correspondiente a suelos congelados de similares características al material que rodea las momias (Chuangchid et al. 2003), se obtuvo un valor de  $U = 1,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$ , el cual fue incorporado en el modelo de simulación propuesto.

iv) La variación de la presión de vapor con la altitud fue tomada en cuenta a través de la siguiente expresión:

$$P_z = P_{nm} * f_{altitud} = P_{nm} * \frac{1}{\exp\left[z / (8430,15 - 0,09514z)\right]} \quad (18)$$

donde  $P_z$  es la presión de vapor a una altitud  $z$  (m) y  $P_{nm}$  es la presión de vapor al nivel del mar. Para la altitud de 6739 m a la cual se encontraban las momias el factor de altitud fue igual a 0,42.

De esta manera la Ec. 4 se transforma en la siguiente expresión considerando el factor altitud:

$$N = k_g f_{altitud} (a_w P_{sat}(T_{sup}) - HRP_{sat}(T_a)) = k'_g (a_w P_{sat}(T_{sup}) - HRP_{sat}(T_a)) \quad (19)$$

siendo  $k'_g$  el coeficiente de transferencia de materia en la altura.

De lo expresado hasta aquí se evidencia para este período la necesidad de conocer el coeficiente de transferencia de materia  $k'_g$  (s/m), el cual incide directamente sobre la pérdida de peso. La estimación del mismo se realizó aplicando el método inverso, el cual consistió en variar dicho coeficiente en el modelo de simulación hasta que logre predecir la velocidad de pérdida de peso por año presentadas en la Tabla 3. Las simulaciones computacionales se

efectuaron para el período de tiempo de un año. Los valores obtenidos de esta forma son presentados en la Tabla 4.

	$k'_g$ (s/m)
Niño	$8.80 \cdot 10^{-12}$
Doncella	$2.80 \cdot 10^{-12}$
Niña del Rayo	$1.25 \cdot 10^{-12}$

Tabla 4. Coeficientes de transferencia de materia  $k'_g$  (s/m) obtenidos por el método inverso.

En la Figura 8 se presentan las curvas de pérdida de peso, para los tres cuerpos, obtenidas por el modelo de simulación para el primer año en la Cumbre del LLullaillaico. Como puede observarse al comienzo la disminución del peso es rápida, luego se produce un cambio de pendiente y la pérdida se hace más lenta. Esto se debe a que la temperatura del cuerpo alcanza la temperatura ambiente y de esta manera desaparece la contribución debida a la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y el medio a la fuerza impulsora para la pérdida de peso.

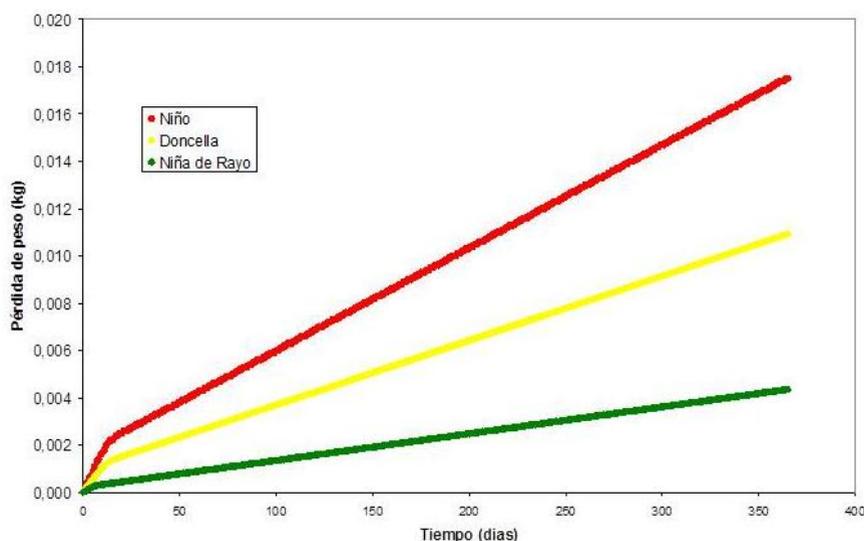


Figura 8. Pérdida de peso simulada de los cuerpos durante el primer año en la cumbre.

Las velocidades de secado para el período de tiempo antes de que se igualen la temperatura del cuerpo con la ambiente (velocidad de pérdida de peso 1) y después de esta instancia (velocidad de pérdida de peso 2) son presentadas en la Tabla 5.

	Velocidad de pérdida de peso 1 (kg/s)	Velocidad de pérdida de peso 2 (kg/s)
Niño	$1.83 \cdot 10^{-9}$	$5.04 \cdot 10^{-10}$
Doncella	$1.14 \cdot 10^{-9}$	$3.16 \cdot 10^{-10}$
Niña del Rayo	$5.10 \cdot 10^{-10}$	$1.31 \cdot 10^{-10}$

Tabla 5. Velocidades de deshidratación obtenidas por el modelo para los tres cuerpos.

#### Determinación del espesor de la capa deshidratada

Para determinar el espesor de la capa deshidratada se consideró la humedad inicial de los cuerpos ( $Y_0$ ) (estimada en aproximadamente 75%), la velocidad de pérdida de peso dada por la pendiente de las curvas de la Figura 8 y el contenido de humedad de la capa deshidratada que permanece como hielo absorbido ( $f_{ads}$ ) en equilibrio con una humedad ( $HR$ ) del aire que los rodea, del 42,59%. Este último parámetro fue determinado por la siguiente correlación propuesta por Chumak y Sibiariakov (1988) para la obtención de la curva de desorción del hielo en carnes:

$$f_{ads} = \exp(A_1 + A_2 HR + A_3 HR^2 + A_4 HR^3), \quad (20)$$

donde los parámetros  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  y  $A_4$  dependen de la temperatura:

$$A_1 = -2,7349 - 0,01513 T - 5,064 \cdot 10^{-4} T^2 - 4,083 \cdot 10^{-6} T^3 \quad (21)$$

$$A_2 = 5,089 \cdot 10^{-2} + 2,269 \cdot 10^{-3} T + 8,285 \cdot 10^{-5} T^2 + 9,172 \cdot 10^{-7} T^3 \quad (22)$$

$$A_3 = -9,442 \cdot 10^{-4} - 7,085 \cdot 10^{-5} T - 2,673 \cdot 10^{-6} T^2 - 3,206 \cdot 10^{-8} T^3 \quad (23)$$

$$A_4 = 7,323 \cdot 10^{-6} + 6,188 \cdot 10^{-7} T + 2,3371 \cdot 10^{-8} T^2 + 2,9 \cdot 10^{-10} T^3 \quad (24)$$

De esta manera se obtuvo un contenido de humedad de equilibrio en la capa deshidratada de 17,65 % (b.s.), 15,00 % (b.h.), lo cual es equivalente a 0,044 (kg agua/kg sólido húmedo inicial).

Agua sublimada por unidad de peso:

$$\left( 0,750 \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{sol.humedo}}} - 0,044 \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{sol.humedo}}} \right) = 0,706 \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{sol.humedo}}} \quad (25)$$

Agua sublimada por unidad de volumen:

$$\begin{aligned} 0,706 \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{sol.humedo}}} \rho_{\text{tejido}} &= 0,706 \left( \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{sol.humedo}}} \right) * 991,95 \left( \frac{\text{kg}_{\text{sol.humedo}}}{\text{m}^3_{\text{sol.humedo}}} \right) = \\ &= 700,317 \left( \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{m}^3_{\text{sol.humedo}}} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

donde la densidad del tejido muscular que se deshidrata ( $\rho_{\text{tejido}}$ ) fue obtenida mediante siguiente la correlación propuesta por (Sanz et al. 1987) para carnes congeladas.

$$\rho_{\text{tejido}} = \frac{1053}{0,982 + 0,113Y_0 + 0,257(1 - Y_0)T^{-1}} \quad (27)$$

donde  $Y_0$  es el contenido de agua inicial.

Agua sublimada por espesor de capa deshidratada (m):

$$700,317 \left( \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{m}^3_{\text{sol.humedo}}} \right) * \text{área}_{\text{cuerpo}}(\text{m}^2) = \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{m}_{\text{espesor}_{\text{cd}}}} \quad (28)$$

Considerando las áreas obtenidas por medio de la reconstrucción computacional para cada uno de los cuerpos, presentadas en la Tabla 2, se obtuvieron los valores de 376,28; 741,17 y 689,88 (kg\_agua/m\_espesor<sub>cd</sub>) para el Niño, la Doncella y la Niña del rayo, respectivamente.

Por su parte, la velocidad instantánea de formación de la capa deshidratada se calculó por medio del producto de la velocidad de secado, que se corresponde con la primera derivada para cada instante de tiempo de las curvas presentadas

en la Figura 8, por la inversa del agua sublimada por espesor de capa deshidratada obtenida anteriormente.

$$\frac{dx}{dt} = vel.sec\ ad_{cp} \left( \frac{kg\_agua}{s} \right) \left( \frac{kg\_agua}{m\_espesor_{cd}} \right)^{-1} \quad (29)$$

Integrando la función velocidad de formación de la capa deshidratada obtenemos la evolución del espesor de la dicha capa con el tiempo, la cual es mostrada para cada una de las momias en la Figura 9.

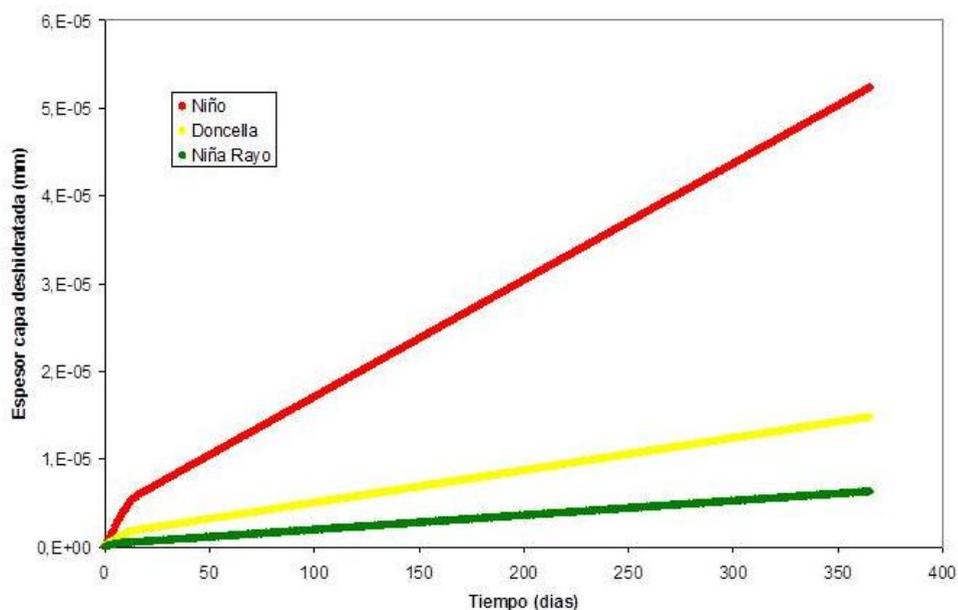


Figura 9. Evolución de la capa deshidratada de los cuerpos durante el primer año en la cumbre.

Finalmente se muestran en la Tabla 6 los espesores de la capa deshidratada, obtenidos por el modelo de simulación, que presentan los cuerpos luego de su exposición a las condiciones ambientales de la cumbre del Llullaillaco.

	Espesor final de la capa deshidratada (mm)
Niño	26.2
Doncella	7.42
Niña del Rayo	3.18

Tabla 6. Espesor final de la capa deshidratada luego de 500 años en la cumbre.

Una de las observaciones que debe realizarse de la Tabla 6, es que dichos espesores fueron calculados considerando que el fenómeno de sublimación se produce únicamente en la superficie de los cuerpos. Por su parte, de acuerdo a los estudios radiológicos de Previgliano et al. (2005), la mayoría de los órganos internos de los cuerpos de las momias presentaron una disminución del volumen debida a deshidratación por sublimación. Lo anterior indica que el proceso de sublimación no sólo se produjo en la superficie de los cuerpos, sino también en los órganos internos de las momias, lo que implicaría que los espesores obtenidos a través del modelo, para la capa deshidratada en la superficie, están sobredimensionados con relación a los reales.

Por otro lado, se evidencia en la Figura 9 que el Niño habría experimentado una velocidad de deshidratación considerablemente mayor que los otros dos cuerpos. Esto podría atribuirse en parte a que el cuerpo del Niño se encontraba, en la plataforma ceremonial, enterrado a una menor profundidad y más alejado de las paredes, es decir con una mayor exposición a los vientos lo que favoreció la pérdida de peso (ver Figura 6). Por otra parte, la estimación realizada por Vigl (2005), de que el Niño perdió 8 kg durante su período en la cumbre estaría sobredimensionada, ya que no tuvo en cuenta la disminución del peso corporal que el mismo sufrió previo a su muerte durante el extenso viaje de Perú al Volcán Lullailaco, como consecuencia de una gran desmejora que presentaba su estado de salud, hecho que no fue evidenciado en los restantes cuerpos.

#### Distribución de temperaturas en los cuerpos

La Figura 10 muestra a manera de ejemplo las distribuciones de temperaturas obtenidas por el modelo de simulación en los tres cuerpos. En ella se puede

observar que las zonas del cuerpo más susceptibles a los cambios de temperaturas son los brazos y los pies.

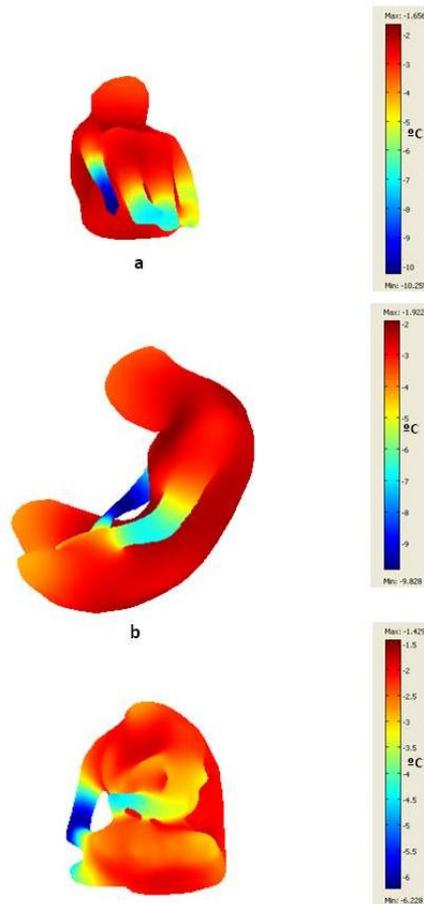


Figura 10. Distribución de temperaturas en a) Niño, b) Doncella y c) Niña del Rayo luego de 6 días en la cumbre.

### Período en Freezer de Universidad Católica de Salta:

Desde su descubrimiento, hasta su colocación en capsulas, en el año 2007 las momias estuvieron conservadas en freezers. Dichos freezers estuvieron en el predio de la Universidad Católica de Salta hasta agosto de 2004 y luego se trasladaron al MAAM, donde se utilizaron para conservar las momias hasta julio de 2007. En una primera etapa los cuerpos estaban descubiertos y expuestos a una temperatura media de  $-13^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa (HR) del aire que los

rodea de 80%. Luego los cuerpos se embolsaron al vacío y se los sometió a una temperatura de  $-16^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa del aire de 75%.

Debe señalarse que no existe información respecto de constancia de temperatura y humedad o bien de sus correspondientes oscilaciones entre otras variables operativas.

### Variación de Peso de los Cuerpos

En la Figura 11 se presenta la variación de los pesos de las momias desde su colocación en los freezers en marzo de 1999 hasta abril de 2006, considerando que estuvieron permanentemente a las temperaturas y humedad promedio. En la misma se puede observar que los cuerpos experimentaron un aumento continuo en su peso hasta su colocación en bolsas al vacío en enero de 2004. Debido a que no se encontraron registros de los pesos iniciales de las momias, estos fueron estimados a partir de las velocidades de rehidratación de los cuerpos en el período 2001-2004.

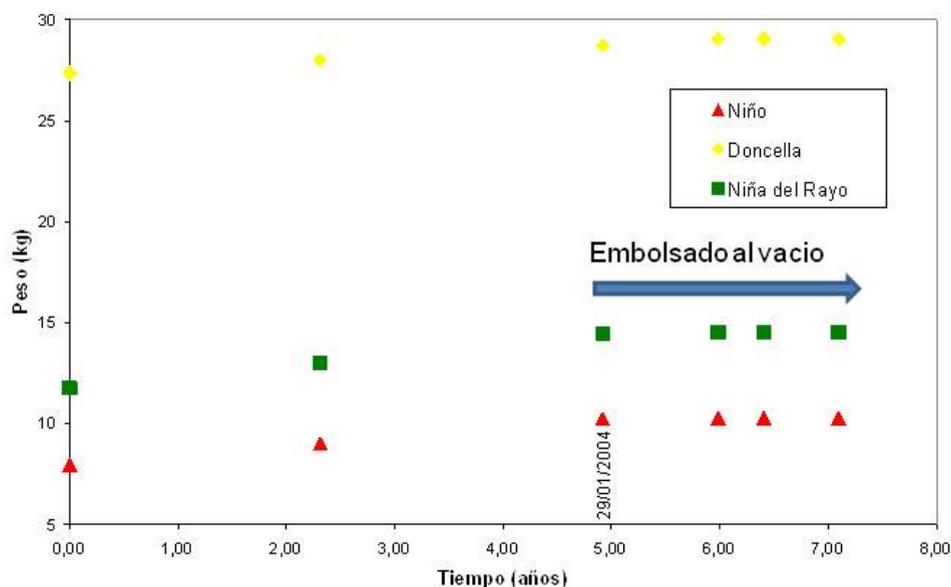


Figura 11. Evolución del peso de los cuerpos durante el período en freezer.

Los pesos iniciales calculados, así como también las velocidades de rehidratación y la ganancia de peso son mostrados a continuación en la Tabla 7.

	Peso inicial estimado (kg)	Ganancia de peso total (kg)	Velocidad de ganancia de peso (kg/año)
NIÑO	7.911	2.319	0.471
DONCELLA	27.353	1.376	0.279
NIÑA DEL RAYO	11.745	2.672	0.543

Tabla 7. Ganancia de peso de los cuerpos desde su colocación en freezer hasta su embolsado al vacío.

### Consideraciones en la implementación del modelo matemático

En base a las condiciones antes mencionadas se realizan las siguientes consideraciones en la implementación del modelo de simulación para dicho período:

i) El coeficiente de transferencia de calor entre el cuerpo y el medio que lo rodea debe considerar en este período la capa deshidratada de los cuerpos, la cual es variable con el tiempo. Para esto se calcula un coeficiente de transferencia de calor efectivo ( $U$ ) variable en función del espesor de la capa deshidratada mediante la siguiente expresión:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{e_{cd}(t)}{k_{cd}} \quad (30)$$

Considerando  $h= 3,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$  según lo estimado por Mall y Eisenmenger (2005) para cuerpos humanos en aire estanco y una conductividad térmica de la capa deshidratada ( $k_{cd}$ )  $0,065 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$  (Campañone et al. 2001), se obtuvo el valor de  $U$  en función del tiempo el cual fue incorporado en el modelo de simulación propuesto.

### Determinación del espesor de la capa deshidratada

La determinación de la evolución del espesor de la capa deshidratada se realizó de la misma forma que para el período anterior considerando el espesor que inicialmente presentaban los cuerpos al momento de su colocación en los freezers (Tabla 6), la humedad de los cuerpos, las velocidades de ganancia de

peso (Tabla 7) y el contenido de humedad de la capa deshidratada que permanece como hielo absorbido. Este último fue estimado en 21,7% (b.h.) para una humedad del ambiente (*HR*) del 80%.

La figura 12 presenta la evolución simulada del espesor de capa deshidratada para los tres cuerpos. En dicha figura se puede observar la rehidratación de los cuerpos durante el período en los freezers de la UCS. Esta rehidratación de los cuerpos fue debida a las fluctuaciones de temperaturas que se producen en un ciclo normal de estos equipos de refrigeración. Esto origina que, en parte de dicho ciclo, la temperatura de la superficie de los cuerpos sea menor que la del ambiente originando el fenómeno de condensación de la humedad del ambiente sobre los cuerpos, lo que conlleva a la rehidratación y aumento de peso de los mismos.

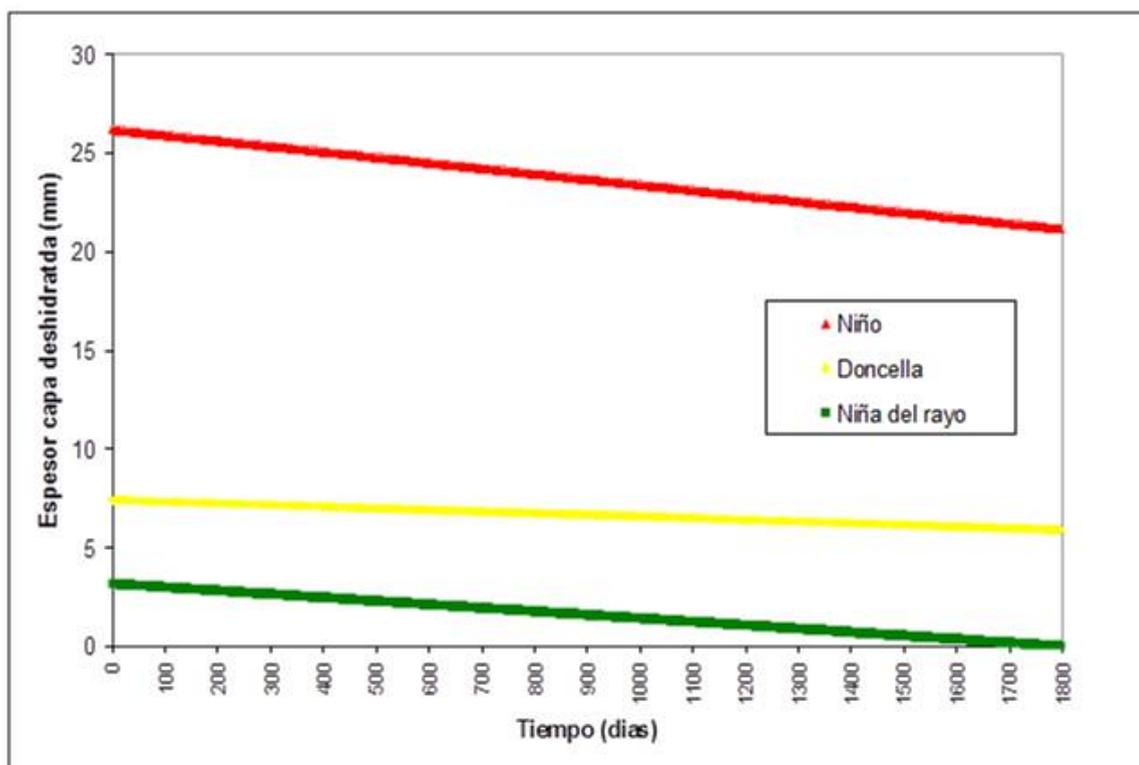


Figura 12. Evolución del espesor de la capa deshidratada durante su período de rehidratación en los freezers de UCS

A modo de ejemplo se muestran en las Figuras 13a y b las variaciones de peso obtenidas por el modelo de simulación para la Doncella sometida a un ciclo de

temperaturas que va de  $-11$  a  $-13^{\circ}\text{C}$  y a una temperatura constante de  $-13^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Como puede observarse las fluctuaciones de temperaturas favorecen la rehidratación del cuerpo por condensación (Figura 13.a), mientras que el fenómeno que prevalece a una temperatura constante de  $-13^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa del ambiente de 80% es el de deshidratación por sublimación (Figura 13b).

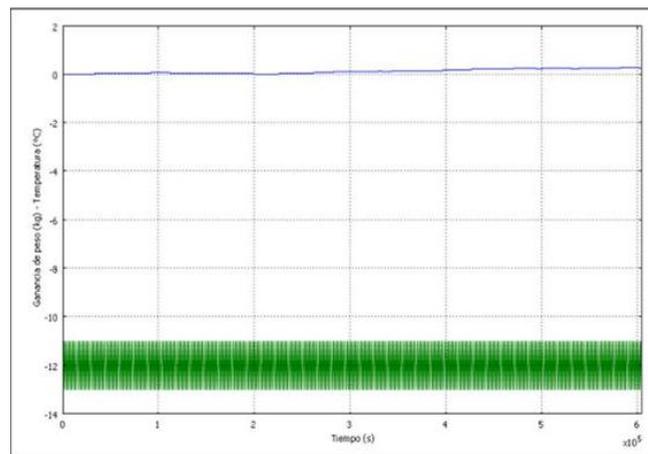
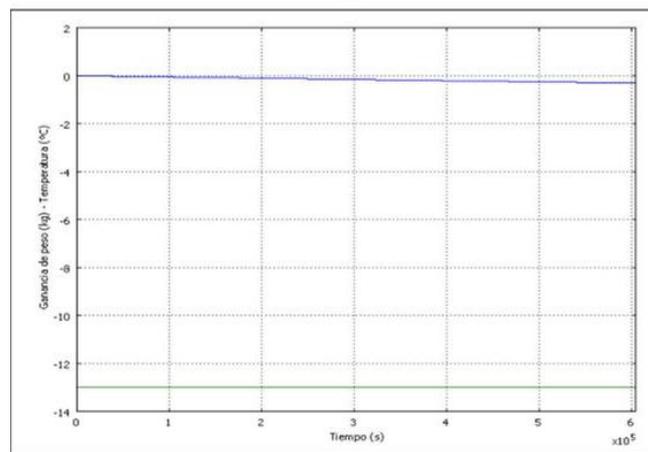
**a****b**

Figura 13. (-)Ganancia de peso y (-) temperatura ambiente para la Doncella expuesta a a) ciclo variable de temperatura y b) temperatura constante.

### Período en Cápsulas del Museo de Arqueología de Alta Montaña de Salta

Desde el año 2007 las momias se encuentran conservadas en Cápsulas en el Museo de Arqueología de Alta Montaña de Salta (MAAM). En dichas cápsulas las condiciones de preservación adoptadas fueron las siguientes:

Temperatura ambiente:  $-20^{\circ}\text{C}$

Humedad Relativa del ambiente: 70%

Presión: 30 mbar.

Estos sistemas de preservación tienen instrumentados procesos continuos de monitoreo y control de dichas variables ambientales logrando el correcto mantenimiento de las mismas.

El modelo desarrollado para este período fue equivalente al de los dos anteriores, considerando las condiciones ambientales antes mencionadas y las características propias del sistema de preservación.

La Figura 14 muestra los fenómenos físicos que se producen en función de las condiciones de preservación (temperatura y humedad relativa del medio ambiente) cuando se alcanza un equilibrio térmico entre la superficie del cuerpo y el medio refrigerante, y las temperaturas de ambos se igualan. La línea que separa las zonas de condensación y sublimación corresponde a las condiciones óptimas de preservación en cuanto al peso de los cuerpos, es decir para estas condiciones el flujo de agua – descrito en el modelo por la Ec. 4 - es nulo y por tanto dicho peso se mantiene constante.

En dicha figura se puede observar que en la actualidad los cuerpos se encuentran en cercanía de las condiciones óptimas de preservación, siempre y cuando se mantengan las condiciones ambientales y se alcance el equilibrio térmico. No obstante, en estas condiciones ambientales los cuerpos podrían sufrir una ligera deshidratación, aunque variaciones bruscas de la temperatura del medio refrigerante podrían originar el fenómeno contrario.

En la Figura 14 los puntos correspondientes a la “línea óptima sin sobrepresión” fueron regresionados mediante un polinomio de segundo grado, obteniéndose la siguiente expresión:

$$HR = 0,994 - 0,0047T_a + 10^{-5}T_a^2 \quad (31)$$

Los puntos correspondientes a la “línea óptima con sobrepresión de 30 mbar” fueron regresionados mediante la siguiente expresión:

$$HR = 0,9873 - 0,0047T_a + 3 * 10^{-3} T_a^2 \quad (32)$$

Esta última expresión podrá ser utilizada de guía a los fines de poder establecer las condiciones óptimas de preservación de los Niños en las cápsulas del MAAM.

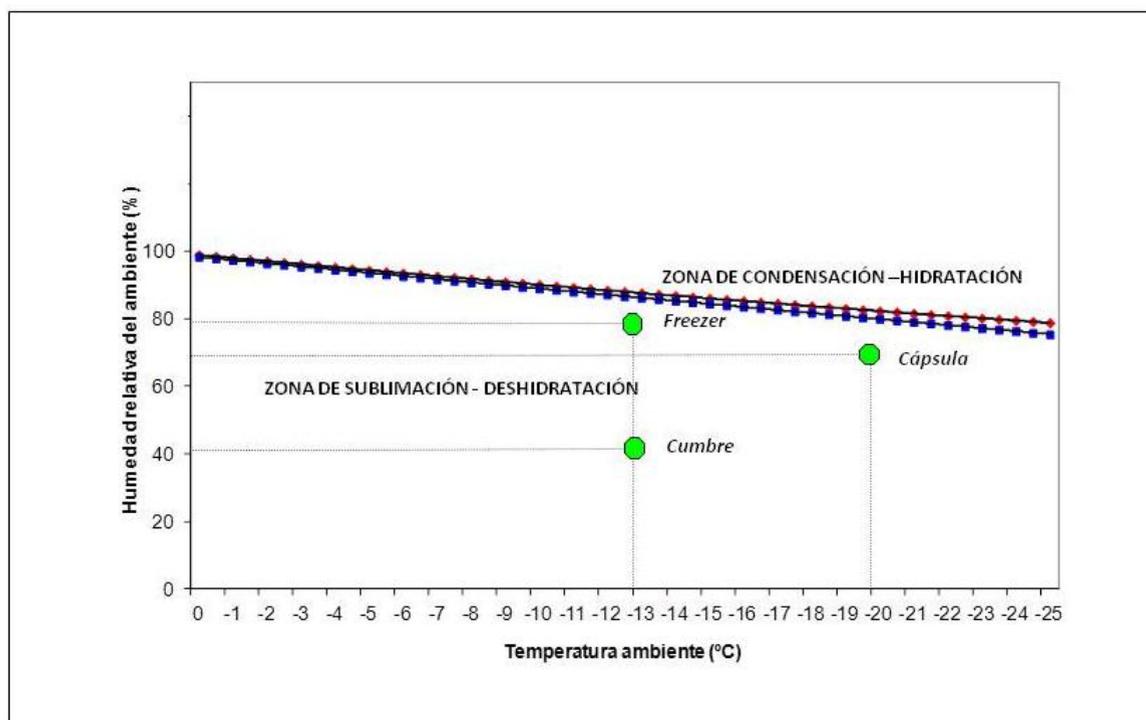


Figura 14. Diagrama de zonas de sublimación y condensación en función de la temperatura y humedad relativa del ambiente. (●) Línea óptima (■) Línea óptima con sobrepresión de 30 mbar.

La Figura 14 también presenta la ubicación de las condiciones medias correspondientes a los dos períodos anteriores.

## **Discusión y Conclusiones**

Uno de los principales objetivos que se propuso con este estudio fue establecer las condiciones óptimas en cuanto a la preservación del peso de las momias. En este sentido se desarrollaron, para cada uno de los períodos, modelos matemáticos que describen los procesos de la transferencia de materia y energía, teniendo en cuenta las características ambientales de los mismos. Por otro lado se planteó como objetivo la identificación de los factores ambientales que propiciaron la conservación de los cuerpos, con vistas a establecer condiciones óptimas de preservación en cuanto al peso de las momias.

Con respecto a esto podemos concluir que para el primer período, correspondiente al estadio de las momias en la Cumbre del Lulluillaco, las momias estuvieron expuestas a condiciones de deshidratación. La muy buena preservación de las mismas reflejada por la baja velocidad de pérdida de peso (ver Tabla 3) se podría haber debido a la resistencia a la transferencia de materia impuesta por el lecho rocoso, lo que a su vez amortiguó cambios bruscos de temperatura evitando el fenómeno de condensación. Por otra parte la altura de la Cumbre del Lulluillaco fue uno de los factores que favoreció la conservación de los cuerpos, como se puede observar en la Ec. 19 disminuyó el flujo de vapor afectándolo por un factor de 0,41.

En el segundo período, correspondiente al estadio en los freezers de la Universidad Católica de Salta, si bien las momias estuvieron expuestas a condiciones de deshidratación, como lo indica la Figura 14, no se alcanzó el equilibrio térmico entre la superficie del cuerpo y el ambiente, debido a las fluctuaciones térmicas de este último provocadas por el ciclo normal de funcionamiento y la apertura del freezer. Este hecho favoreció la condensación del vapor sobre los cuerpos y la rehidratación de los mismos, con el correspondiente aumento de peso. La posterior colocación de los cuerpos en las bolsas impidió la hidratación actuando las mismas como una barrera mecánica al flujo de vapor.

Finalmente para el estadio de las momias en el MAAM la aplicación de sobrepresión como también el control estricto de las condiciones de temperatura y humedad evito la deshidratación de los cuerpos manteniendo así el peso de las momias durante este período. Por otro lado el modelo matemático desarrollado (ver Ec. 32) permite determinar, de forma simple, el comportamiento de los cuerpos en cuanto a su peso y fijar condiciones óptimas de preservación.

Con lo expuesto hasta aquí se puede concluir que los resultados obtenidos a través de la resolución numérica de los modelos planteados permitieron interpretar los fenómenos físicos que ocurrieron, ocurren y pueden ocurrir en los cuerpos y en función de ello establecer las condiciones óptimas de conservación de los mismos.

### **Agradecimientos**

Los autores de este trabajo agradecen el financiamiento económico realizado por el gobierno de la provincia de Salta.

Al doctor Alejo Scarano del Museo de Ciencias Naturales de La Plata por la colaboración en la reconstrucción de las geometrías tridimensionales de los cuerpos.

### **Notas**

<sup>1</sup> Parte de los resultados correspondiente al período en la cumbre del Llullaillaco han sido previamente publicados en: Lespinard, A.R., Bernaski, M., Recagno, G., Mascheroni, R.H. 2012. Modelado matemático de la dinámica física de los Niños del Llullaillaco. *Mecánica Computacional* 31: 2013-2029.

### **Bibliografía citada**

- Campañone, L.A., Salvadori, V.O. y Mascheroni R.H.  
2001. Weight loss during freezing and storage of unpackaged foods. *Journal of Food Engineering* 47: 69-79.
- Catálogo del Museo de Arqueología de Alta Montaña 2009. 1a ed.  
Gobierno de la provincia de Salta. Salta.
- Chuangchid, P., Ihm, P. y Krarti, M.  
2004. Analysis of heat and moisture transfer beneath freezer foundations. Part I. *ASME Journal of solar energy engineering* 126(2): 716-726.
- Chumak, I.G. y Sibiriakov, P.V.  
1988. Influencia de los parámetros del aire dentro de una cámara frigorífica en el contenido de humedad de la superficie de la carne durante la refrigeración (en ruso). *Izvestia vuzov, Pischevaia tehnologuia* 2: 54.
- Chuntranuluck, S., Wells, C. M., y Cleland, A. C.

1998. Prediction of chilling times of foods in situations where evaporative cooling is significant - part 1 methods development. *Journal of Food Engineering* 37: 111-125.

Fikiin, A.

1974. Sur les paramètres thermophysiques des produits alimentaires congelés. In *Current studies on the thermophysical properties of foodstuffs – Proceedings of the Meetings of IIR Commissions B1, C1 and C2 in Bressanone (Italy)* (pp. 173–181). Refrigeration Science and Technology, IIR-Paris.

Hamdami, N., Monteau, J.Y. y Le Bail, A.

2004. Simulation of coupled heat and mass transfer during freezing of a porous humid matrix. *International Journal of Refrigeration* 27: 595-603.

Jame, Y.W. y D. I. Norum, D.I.

1980. Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous medium. *Water Resour. Res.* 16(4): 811–819.

Lespinard, A.R., Bernaski, M., Recagno, G., Mascheroni, R.H.

2012. Modelado matemático de la dinámica física de los Niños del Lullailaco. *Mecánica Computacional* 31: 2013-2029.

Mall, G. y Eisenmenger. W.

2005. Estimation of time since death by heat-flow Finite-Element model. Part I: method, model, calibration and validation. *Legal Medicine* 7:1-14.

Mascheroni, R.H.

1977. Transferencia de calor con simultáneo cambio de fase en tejidos cárneos, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata.

Murphy, D., y Koop T.

2005. Review of the vapour pressures of ice and supercooled water for atmospheric applications. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 131: 1539–1565.

Previgliano, C.H., Ceruti, C., Arias Aráoz, F., González Diez, J. y Reinhard, J.

2005. Radiología en estudios arqueológicos de momias incas. *Rev. Argent. Radiol.* 69: 199- 209.

Reinhard, J.

1999. Congelados en el tiempo. *National Geographic en Español*. 5(5): 36-55. Washington D.C.

Reinhard, J. y Cerruti, C.

2000. Investigaciones Arqueológicas en el volcán Llullaillaco. Ediciones de la Universidad Católica de Salta. Argentina.

Riedel, L.

1978. Eine Formel zur Berechnung der Enthalpie fettarmer Lebensmittel in Abhängigkeit von Wassergehalt und Temperatur. *Chem. Mikrobiol. Technol. Lebensm.* 5: 129–133.

Sanz P.D., Dominguez M. y Mascheroni R.H.

1987. Thermophysical properties of meat products. General bibliography and experimental data. *Trans. ASAE* 30: 283.

Taylor, G. S. y Luthin, J. N.

1978. A Model for Coupled Heat and Moisture Transfer During Soil Freezing. *Comput. Graph. Image Process.* 15(4): 548–555.

Vigl, E.E.

2005. Los Niños del Llullaillaco: El testimonio científico en la condición de las tres momias incas del Llullaillaco y propuestas para su preservación. *Resumen del Informe de Bolzano.*

Vitry, C.

2001. Los Niños del Volcán Llullaillaco. Un importante hito en la arqueología de alta montaña. NAYA, Noticias de Antropología y Arqueología (versión digital). Equipo NAYA. <http://www.naya.org.ar>