Recibido:10/09/2026 Aprobado:16/10/2026

DOI: https://doi.org/10.70208/3007.8245.v6.n3.619

Secado termo-higro-mecánico de ocho variedades de quinua

Ing. Isrrael Fábrica Quispe
isrraelfcaq@hotmail.com
https://orcid.org/0009-0008-9505-4250
Universidad Técnica de Oruro
Facultad Técnica
Bolivia

Javier Lorenzo Rocha Angulo
rochajavierlorenzo@gmail.com
https://orcid.org/0009-0001-2453-2250
Universidad Técnica de Oruro
Facultad Técnica
Bolivia

RESUMEN

Se comparó la respuesta térmica, higroscópica y mecánica de ocho variedades de quinua durante un secado simulado de cuatro horas a 42 °C. Se adaptó un modelo desarrollado para arroz y se resolvió sobre un cuarto de elipse mediante elementos finitos en DOLFINx, dentro de Docker, y en ANSYS Mechanical APDL. El procedimiento acopló conducción de calor, difusión de humedad y contracción higroscópica, con parámetros varietales y condiciones de contorno comunes. La humedad final se aproximó al equilibrio prescrito de 0,065 kg/kg en base seca; su reducción relativa varió entre 61,8 % y 70,5 %. Los mayores esfuerzos entre los estados guardados se registraron a los 30 min y estuvieron entre 2,77 y 3,71 MPa. El desplazamiento final varió de 22,57 a 32,94 μm. Ambos programas coincidieron estrechamente al final, aunque presentaron diferencias durante el transitorio y hasta 7,81 % en el esfuerzo máximo. Los resultados distinguen la contracción acumulada de la solicitación transitoria y permiten seleccionar escenarios para ensayos posteriores. Su uso predictivo requiere calibración experimental y estudios de convergencia.

***Palabras clave**:* quinua; secado, difusión de humedad, contracción higroscópica, elementos finitos

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.
El editor y los revisores declararon no tener conflicto de intereses.

Licencia: CC BY NC ND

Thermo-hygro-mechanical drying of eight quinoa varieties

ABSTRACT

The thermal, moisture and mechanical responses of eight quinoa varieties were compared during a four-hour drying simulation at 42 °C. A model developed for rice was adapted to a quarter-ellipse domain and solved by finite elements in DOLFINx within Docker and in ANSYS Mechanical APDL. The procedure coupled heat conduction, moisture diffusion and hygroscopic shrinkage, with varietal inputs and common boundary conditions. Final moisture approached the prescribed equilibrium of 0.065 kg/kg on a dry basis, with relative reductions of 61.8-70.5%. The largest stresses among the saved states occurred at 30 min and ranged from 2.77 to 3.71 MPa. Final displacement ranged from 22.57 to 32.94 μm. The solvers agreed closely at the final state but differed during the transient stage and by up to 7.81% in peak stress. The results distinguish accumulated shrinkage from transient loading and identify scenarios for subsequent testing. Predictive application requires experimental calibration and convergence studies.

Keywords: quinoa, drying, moisture diffusion, hygroscopic shrinkage, finite elements

The authors declare no conflict of interest.
The Editor and the Reviewers declared no conflict of interest.

License:

INTRODUCCIÓN

El secado de quinua exige retirar agua sin perder la integridad del grano. La geometría y el contenido de humedad condicionan ese transporte, como muestran la caracterización física de Vilche et al. (2003) y los ensayos de difusividad de Gely y Santalla (2007). Para arroz, Cnossen et al. (2003) y Dong et al. (2010) relacionaron la fisuración con las condiciones de secado y la redistribución interna de humedad. Estos antecedentes justifican examinar, además de la humedad media, los gradientes y la respuesta mecánica del grano.

En Colombia, Londoño Fuentes (2007) estudió mediante elementos finitos la integridad estructural del arroz en lecho fluidizado. Osorio Osorio (2009) continuó ese análisis en coordenadas cilíndricas. En el presente estudio se conserva el vínculo entre transporte y contracción, pero se cambian la geometría y los parámetros de entrada para representar casos de quinua boliviana. La adaptación requiere contrastar su comportamiento; las propiedades y los umbrales de rotura del arroz no pueden trasladarse directamente a la quinua.

La investigación sobre quinua ha avanzado hacia modelos y procesos específicos. Luisetti et al. (2023) ajustaron un modelo difusivo con datos de secado convectivo de la variedad Hualhuas. Gutiérrez-Rodríguez et al. (2024) estudiaron el efecto del etanol en granos germinados, y Khan et al. (2025) evaluaron pretratamientos ultrasónicos, germinación y distintas temperaturas de secado. Torrez Irigoyen y Giner (2017) abordaron conjuntamente la transferencia de masa y energía durante el secado-tostado. Esos trabajos sustentan la descripción del transporte, aunque sus tratamientos y condiciones difieren de los considerados aquí.

El problema del presente manuscrito es comparar la evolución del secado y la solicitación mecánica de ocho casos varietales bajo una misma condición exterior. Se añade el contraste entre dos implementaciones y el análisis espacial del esfuerzo y del desplazamiento. El alcance es el grano aislado; los modelos de lecho, como el de Li et al. (2023), incorporan interacciones y circulación de aire que quedan fuera de esta comparación. El objetivo general fue determinar qué diferencias permanecen durante el transitorio y al final del secado. Se establecieron tres objetivos específicos:

- Implementar el modelo adaptado en DOLFINx y contrastar sus resultados con una solución independiente en ANSYS.
- Comparar la evolución térmica e higroscópica y la reducción relativa de humedad de los ocho casos.
- Examinar los campos de esfuerzo y desplazamiento e identificar las mayores solicitaciones entre los estados registrados.

METODOLOGÍA

Diseño y casos de estudio

Se realizó un estudio cuantitativo de simulación, con diseño computacional comparativo. La unidad de análisis fue un grano idealizado y se resolvieron ocho casos seleccionados de manera intencional: Quinua Real, Pasankalla, Huariponcho, Chucapaca, Jach'a Grano, Kurmi, Blanquita y Toledo (Tabla 1). La identificación de los materiales registrados se contrastó con INIAF (2024). No se trabajó con muestras experimentales ni se estimaron diferencias estadísticas entre poblaciones varietales.

Tabla 1. Casos varietales incluidos en la comparación.

Variedad	Procedencia o condición	Grupo en el análisis
Quinua Real	Altiplano sur, Potosí y Oruro	Base
Pasankalla	Material pigmentado andino	Base
Huariponcho	Material nativo del Altiplano central	Base
Chucapaca	Variedad mejorada boliviana	Base
Jach'a Grano	PROINPA, Altiplano central	Ampliada
Kurmi	PROINPA, Altiplano central	Ampliada
Blanquita	PROINPA, Bolivia	Ampliada
Toledo	Registro INIAF, producción en Oruro	Ampliada

Fuente: INIAF (2024) y denominaciones utilizadas en el modelo.

Las condiciones comunes y los parámetros de cada caso se consignan en las Tablas 2 y 3. Los valores son entradas del modelo, no resultados de ensayos realizados en este estudio. Para Jach'a Grano, Kurmi, Blanquita y Toledo se adoptaron parámetros exploratorios dentro del intervalo de los casos base, porque no se contó con una caracterización termomecánica completa. La temperatura exterior y la humedad de equilibrio permanecieron fijas; la altitud y la humedad relativa del contexto de Oruro no se resolvieron como variables atmosféricas independientes.

Tabla 2. Condiciones y constantes comunes introducidas en las simulaciones.

Magnitud	Valor	Unidad
Tiempo total	14 400	s
Paso temporal	1 800	s
Temperatura inicial	8	°C
Temperatura de secado	42	°C
Humedad de equilibrio	0,065	$\frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg m. s.}}$
Coeficiente térmico efectivo	35	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Coeficiente de masa base	0,005	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Difusividad térmica	$6{,}6 \times 10^{-8}$	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
Factor preexponencial de Arrhenius	$1{,}8 \times 10^{4}$	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
Constante térmica de Arrhenius	10 200	K

Fuente: Elaboración propia a partir de los archivos de entrada de DOLFINx y ANSYS.

Tabla 3. Parámetros geométricos, higroscópicos y mecánicos de los ocho casos.

Variedad	r_M (mm)	r_m (mm)	d_0	E (GPa); ν; b	$\frac{h_m}{h_{m,base}}$
Quinua Real	1,12	0,65	0,18	0,45; 0,33; 0,220	0,90
Pasankalla	0,95	0,52	0,20	0,50; 0,34; 0,210	0,85
Huariponcho	0,85	0,45	0,22	0,40; 0,35; 0,250	1,00
Chucapaca	1,00	0,58	0,17	0,48; 0,33; 0,215	0,92
Jach'a Grano	1,08	0,62	0,19	0,46; 0,33; 0,225	0,93
Kurmi	0,92	0,50	0,21	0,43; 0,34; 0,235	0,97
Blanquita	1,03	0,60	0,18	0,47; 0,33; 0,218	0,95
Toledo	1,10	0,63	0,17	0,49; 0,32; 0,210	0,88

Fuente: Elaboración propia: parámetros de entrada del modelo.

Los semiejes de la Tabla 3 definen el cuarto de elipse. El módulo de Young, el coeficiente de Poisson y el coeficiente de contracción se mantuvieron constantes en cada caso. El cociente de la última columna multiplicó el coeficiente superficial de masa de la Tabla 2. Se varió conjuntamente ese conjunto de entradas para representar cada caso, sin un diseño factorial que permitiera aislar el efecto de cada propiedad.

Formulación acoplada

El procedimiento resolvió primero la temperatura, después la humedad y finalmente el equilibrio mecánico. Se empleó conducción transitoria con intercambio superficial de Robin, según las dos primeras ecuaciones. T representa la temperatura, α la difusividad térmica, n la normal exterior y T_e la temperatura del aire. El coeficiente h_q se utilizó en la formulación térmica normalizada, sin un término explícito de calor de evaporación o desorción.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad \text{Ec. (2.2.1)}$$

$$-\alpha \frac{\partial T}{\partial n} = h_q (T - T_e) \quad \text{Ec. (2.2.2)}$$

La humedad d, expresada en base seca, se obtuvo con difusión de Fick y una difusividad dependiente de la temperatura mediante Arrhenius. Los valores de A_1 y B_1 corresponden, respectivamente, al factor preexponencial y a la constante térmica de la Tabla 2. La condición superficial empleó el coeficiente efectivo h_m y la humedad de equilibrio prescrita d_e. En los ejes de simetría se impuso flujo normal nulo.

$$\frac{\partial d}{\partial t} = \nabla \cdot (D(T) \nabla d) \quad \text{Ec. (2.2.3)}$$

$$D(T) = A_1 e^{-\frac{B_1}{273.15 + T}} \quad \text{Ec. (2.2.4)}$$

$$-D(T) \frac{\partial d}{\partial n} = h_m (d - d_e) \quad \text{Ec. (2.2.5)}$$

La contracción se representó como deformación higroscópica proporcional al cambio de humedad, con elasticidad lineal y equilibrio cuasiestático. b es el coeficiente de contracción, d_0 la humedad inicial, I el tensor identidad y σ el tensor de esfuerzos. Las constantes de Lamé λ y μ se calcularon a partir del módulo de Young y del coeficiente de Poisson. En cada eje se anuló el desplazamiento normal correspondiente.

$$\varepsilon_h = b(d - d_0) I \quad \text{Ec. (2.2.6)}$$

$$\sigma = \lambda \, tr(\varepsilon - \varepsilon_h) I + 2\mu(\varepsilon - \varepsilon_h) \quad \text{Ec. (2.2.7)}$$

$$\nabla \cdot \sigma = 0 \quad \text{Ec. (2.2.8)}$$

Discretización y contraste entre programas

DOLFINx utilizó mallas triangulares de 222 a 249 celdas, generadas con Gmsh, y elementos de Lagrange de primer orden (Geuzaine y Remacle, 2009; Baratta et al., 2023). Los problemas de

transporte se integraron de forma implícita con ocho pasos de 1800 s hasta 14 400 s. La relación temporal siguiente se aplicó a cada variable de transporte φ.

$$\varphi^{n+1} - \varphi^{n} \approx \Delta t \frac{\partial \varphi}{\partial t} \qquad \text{Ec. (2.3.1)}$$

Las corridas de DOLFINx se ejecutaron dentro de la imagen Docker dolfinx/dolfinx:stable. Las formas débiles se escribieron en UFL y PETSc resolvió calor y humedad con gradiente conjugado e Hypre; la elasticidad se resolvió con LU y MUMPS. Se conservaron los campos XDMF/HDF5 y las series de resultados. El lanzador de ANSYS se ejecutó desde el entorno venv del proyecto y generó los archivos APDL y CSV de los ocho casos.

ANSYS Mechanical APDL 2024 R2 resolvió el perfil con PLANE223 en configuración axisimétrica y CONTA172 para el intercambio superficial de masa (ANSYS, Inc., 2024). DOLFINx empleó ponderación radial en el transporte, pero una formulación mecánica bidimensional reducida; ANSYS incorporó además la deformación circunferencial. Se compararon medias nodales de temperatura y humedad, máximos nodales de esfuerzo principal y desplazamiento, y la reducción relativa de humedad. Los ocho estados guardados abarcaron de 30 a 240 min. Todas las figuras se exportaron desde los posprocesadores de ANSYS.

El contraste evaluó el comportamiento de ambas implementaciones bajo las mismas entradas. No se realizó calibración experimental, ensayo de fractura ni estudio de convergencia de malla o de paso temporal. Por ello, los máximos se refieren a los estados registrados y el contraste entre programas no se considera validación experimental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Respuesta global y evolución temporal

La Tabla 4 reúne los estados finales y las mayores solicitaciones registradas. Los ocho casos tendieron al mismo estado térmico y a la humedad de equilibrio prescrita. La reducción relativa de humedad se calculó con la expresión siguiente; depende tanto de la humedad final como de la inicial.

$$R_d = \frac{d_0 - d_f}{d_0} \times 100\% \qquad \text{Ec. (3.1.1)}$$

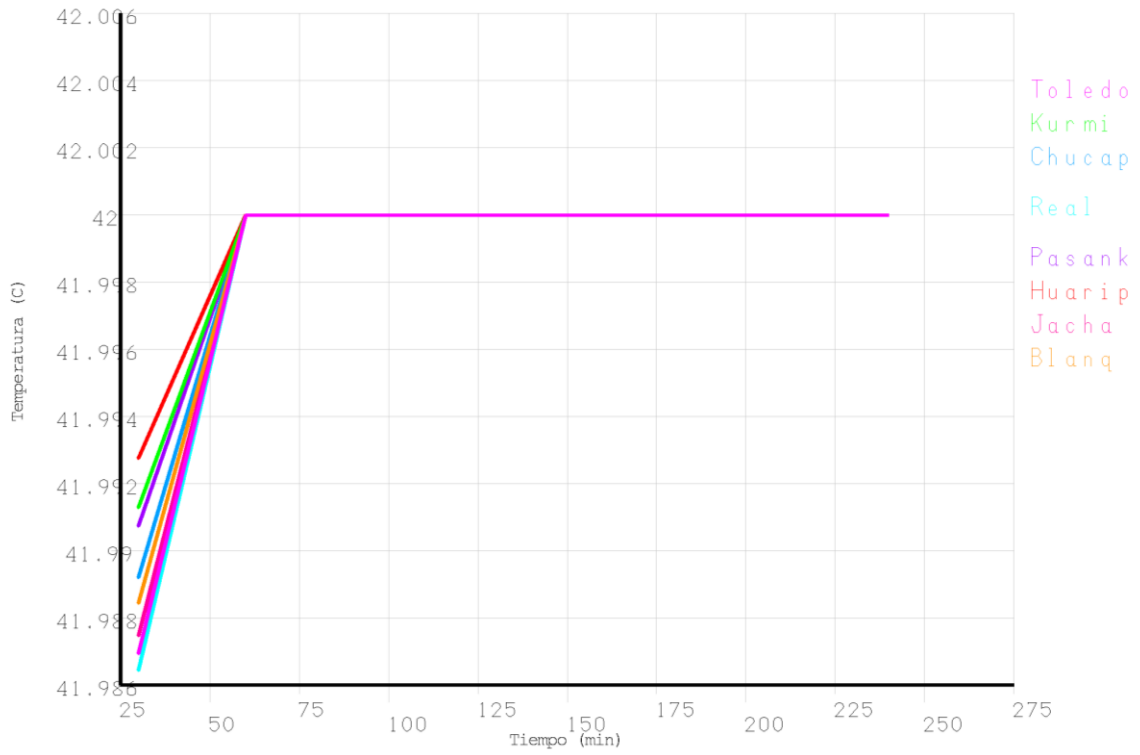
Tabla 4. Resultados finales y máximos entre los estados registrados en ANSYS.

Variedad	T_f (°C)	d_f $\left(\frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg m. s.}}\right)$	R_d (%)	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	u_{max} (µm)
Quinua Real	42,00	0,0650	63,9	3,48	28,34
Pasankalla	42,00	0,0650	67,5	3,23	26,93
Huariponcho	42,00	0,0650	70,5	2,88	32,94
Chucapaca	42,00	0,0650	61,8	2,77	22,57
Jach'a Grano	42,00	0,0650	65,8	3,71	30,37
Kurmi	42,00	0,0650	69,0	3,14	31,35
Blanquita	42,00	0,0650	63,9	3,17	25,82
Toledo	42,00	0,0650	61,8	3,13	24,25

Fuente: Elaboración propia a partir de las series de ANSYS Mechanical APDL 2024 R2.

La mayor reducción relativa correspondió a Huariponcho, mientras el esfuerzo principal más alto correspondió a Jach'a Grano. Esta diferencia impide utilizar un único indicador para ordenar la respuesta de los casos. Las Figuras 1 a 4 permiten distinguir la evolución del transporte, la solicitación transitoria y la contracción acumulada.

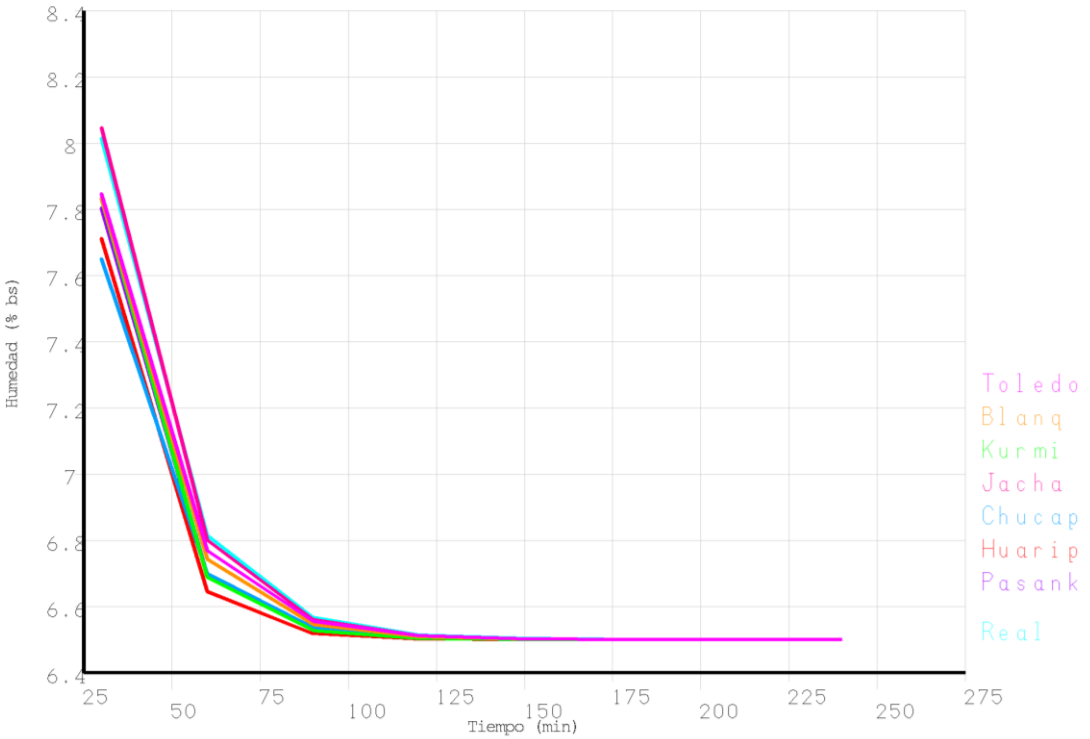
Figura 1. Evolución de la temperatura media nodal de los ocho casos



Fuente: Simulaciones propias en ANSYS Mechanical APDL 2024 R2.

El primer estado guardado ya se encuentra próximo a la temperatura exterior. La escala del eje vertical amplía las pequeñas diferencias entre casos. El intervalo de registro no permite resolver con detalle el calentamiento anterior a los 30 min.

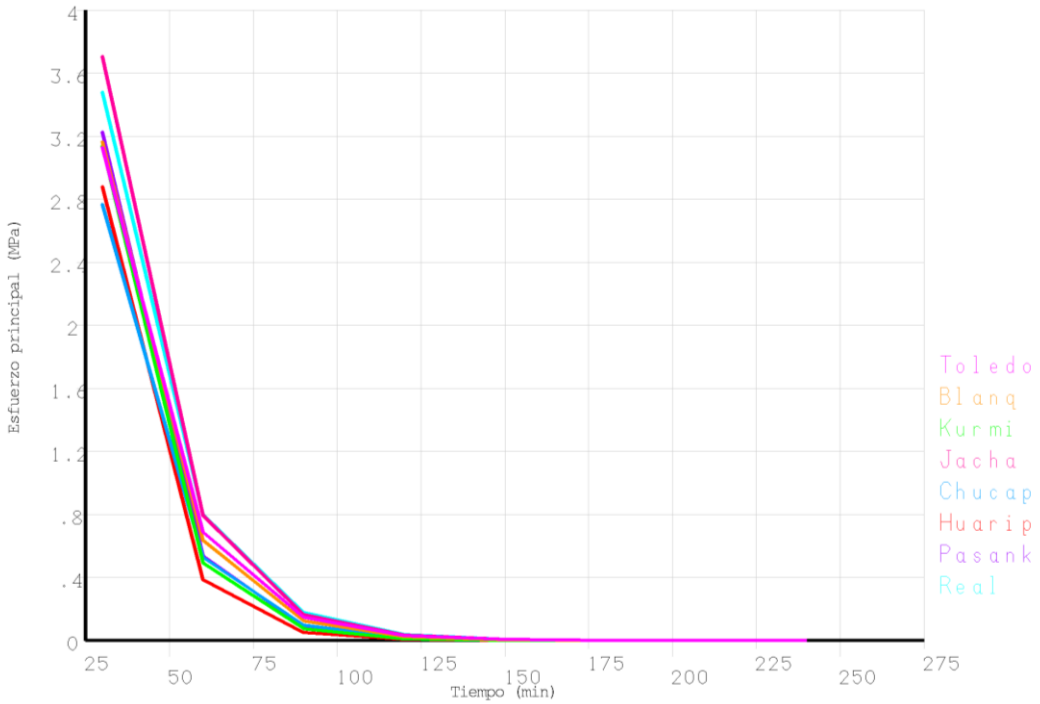
Figura 2. Evolución de la humedad media nodal de los ocho casos, en porcentaje de base seca.



Fuente: Simulaciones propias en ANSYS Mechanical APDL 2024 R2.

Las curvas se separan al inicio y se aproximan conforme progresa la difusión. Su convergencia final es consistente con la condición común de equilibrio. Las diferencias transitorias deben interpretarse junto con las distintas humedades iniciales y los parámetros asignados a cada caso.

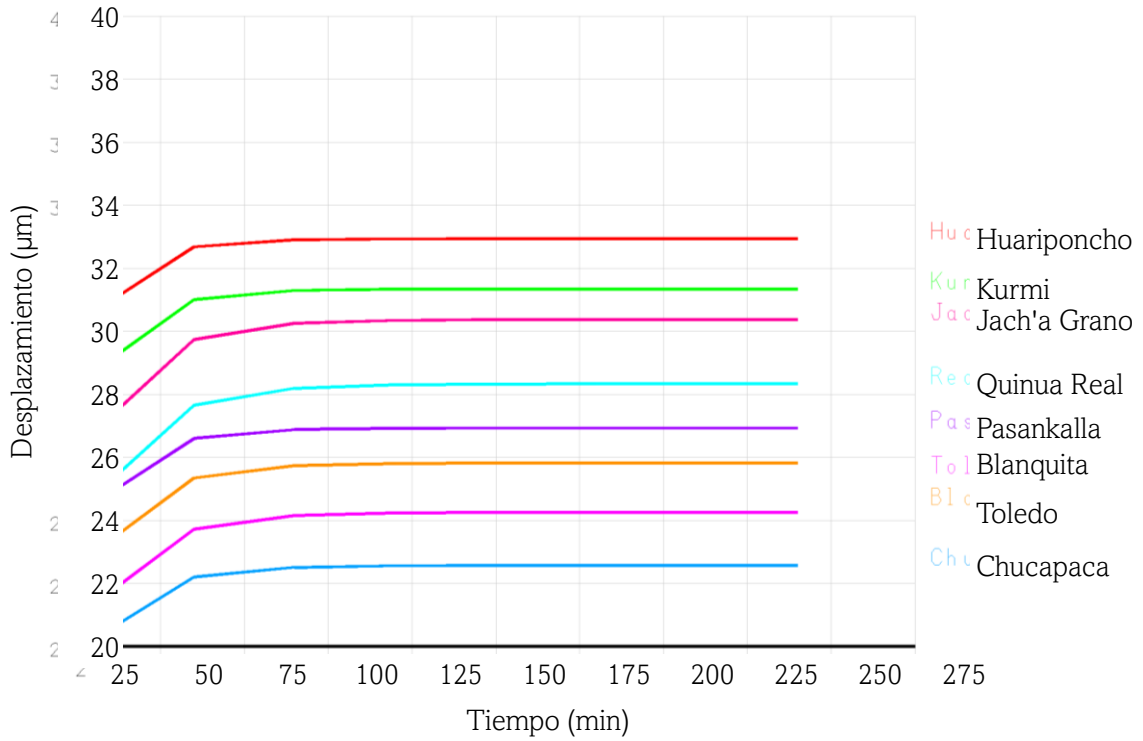
Figura 3. Evolución del máximo nodal del esfuerzo principal de los ocho casos.



Fuente: Simulaciones propias en ANSYS Mechanical APDL 2024 R2.

Los mayores esfuerzos de las series corresponden al primer estado registrado y disminuyen después. El resultado describe la solicitación entre los instantes guardados; no establece el máximo continuo anterior a ese registro ni un umbral de fisuración de la quinua.

Figura 4. Evolución del desplazamiento nodal máximo de los ocho casos.



Fuente: Simulaciones propias en ANSYS Mechanical APDL 2024 R2.

El desplazamiento se estabiliza mientras el esfuerzo disminuye. La deformación acumulada y la solicitación interna no siguen el mismo orden varietal, por lo que ambas magnitudes deben conservarse en la comparación mecánica.

Contraste numérico entre implementaciones

Tabla 5. Diferencias relativas en el esfuerzo máximo registrado y el desplazamiento final, tomando DOLFINx como referencia.

Variedad	$\sigma_{1,max}$ DOLFINx (MPa)	$\sigma_{1,max}$ ANSYS (MPa)	$\Delta\sigma_{1,max}$ (%)	Δu_f (%)
Quinua Real	3,23	3,48	7,81	0,0001
Pasankalla	3,19	3,23	1,18	0,0000
Huariponcho	2,83	2,88	1,97	0,0001
Chucapaca	2,57	2,77	7,81	0,0000
Jach'a Grano	3,45	3,71	7,46	0,0000
Kurmi	3,10	3,14	1,28	0,0000
Blanquita	2,94	3,17	7,80	0,0000
Toledo	2,92	3,13	7,32	0,0001

Fuente: Elaboración propia a partir de los archivos comparativos de DOLFINx y ANSYS.

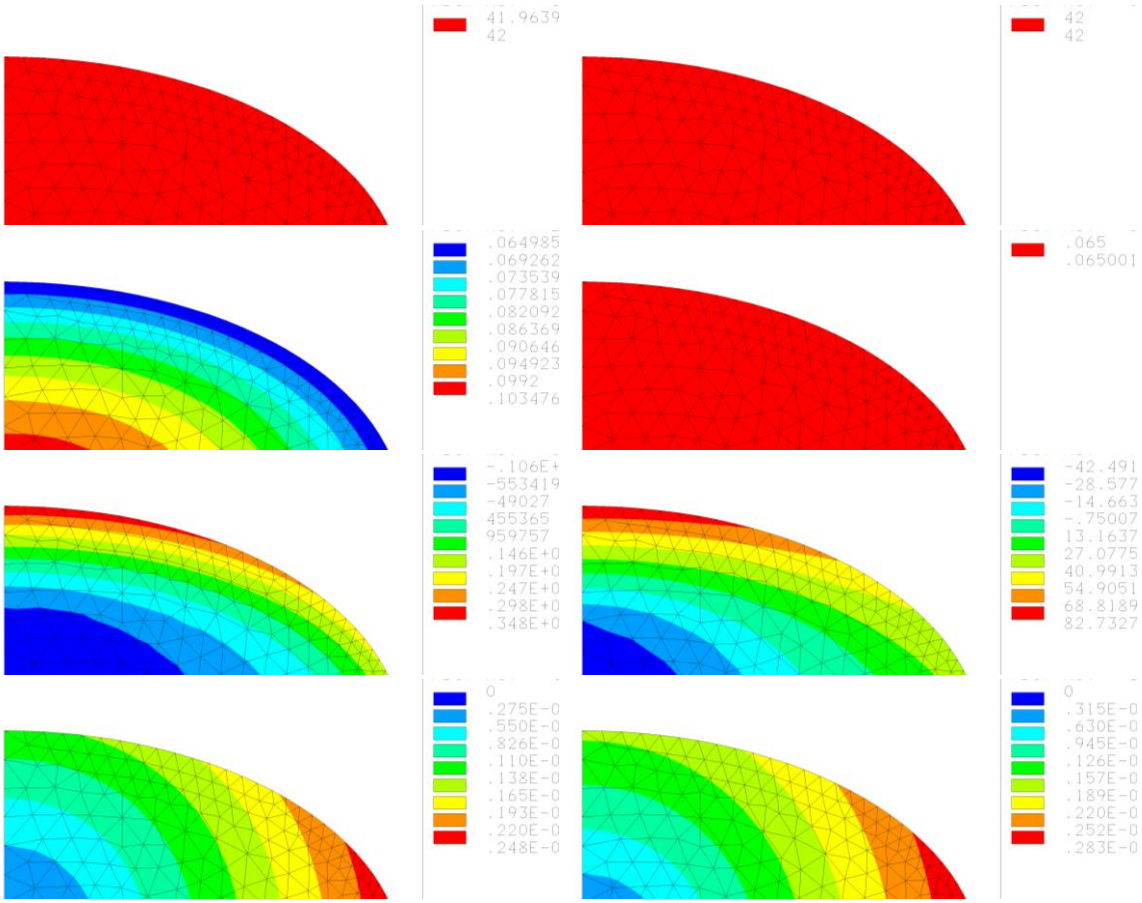
Al final, las diferencias absolutas no superaron 0,00012 °C en temperatura, 0,00000011 kg/kg en humedad y 0,00003 µm en desplazamiento. Durante el transitorio fueron mayores: en el primer estado alcanzaron 0,00323 °C, 0,00376 kg/kg y 0,865 µm, respectivamente. La diferencia relativa de humedad llegó a 4,46 %. Por tanto, el buen acuerdo final no implica que las trayectorias sean idénticas.

Las distintas formulaciones mecánicas y recuperaciones nodales pueden contribuir a las diferencias de la Tabla 5. El contraste respalda el orden de magnitud; la equivalencia local de tensiones requiere unificar la formulación y comprobar la convergencia.

Distribución espacial por caso varietal

Las Figuras 5 a 12 muestran temperatura, humedad, esfuerzo principal y desplazamiento, por filas, a los 30 min (izquierda) y a las 4 h (derecha). Las escalas son independientes; las intensidades de color no son directamente comparables entre paneles.

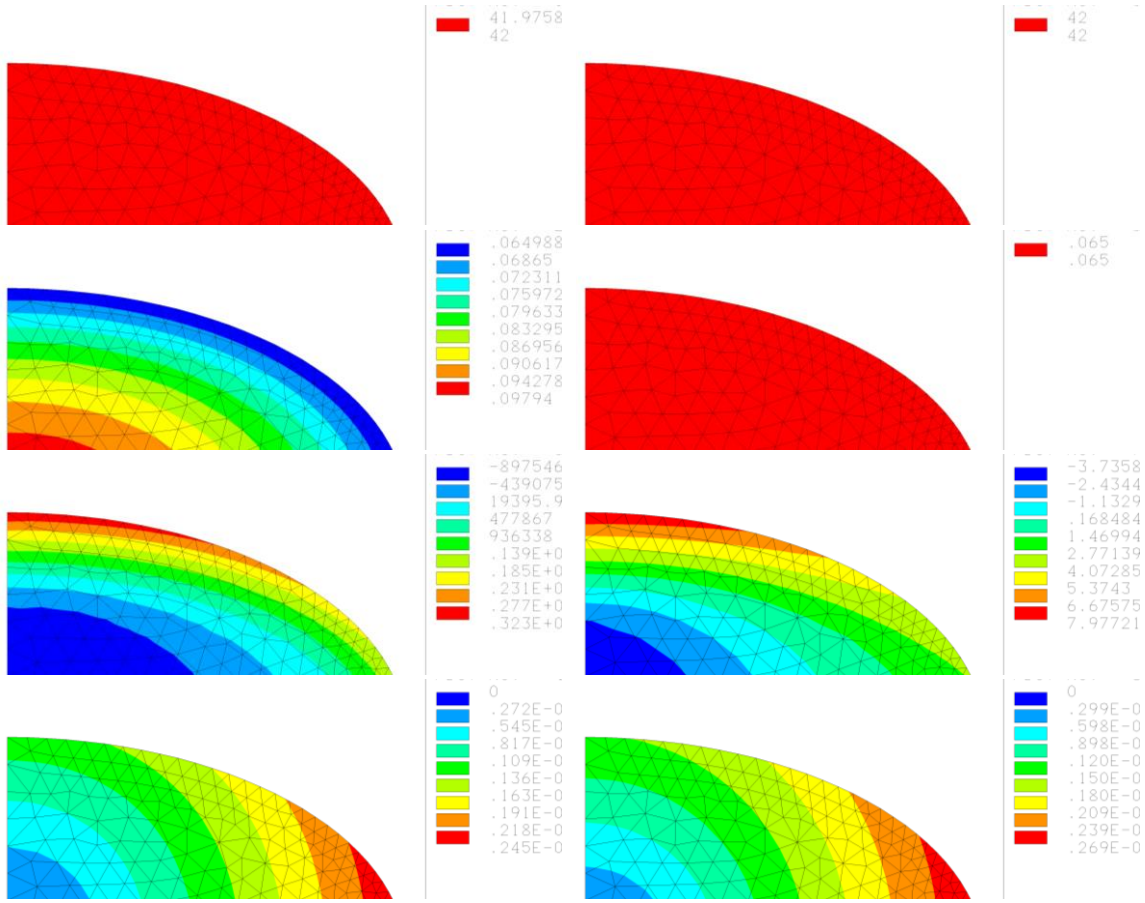
Figura 5. Campos de Quinua Real a los 30 min (izquierda) y a las 4 h (derecha): temperatura, humedad, esfuerzo principal y desplazamiento, por filas.



Fuente: Simulaciones propias en ANSYS Mechanical APDL 2024 R2.

El escenario de Quinua Real presenta gradientes de humedad durante el transitorio y contracción acumulada al final. La respuesta corresponde a los semiejes y propiedades de entrada de la Tabla 3.

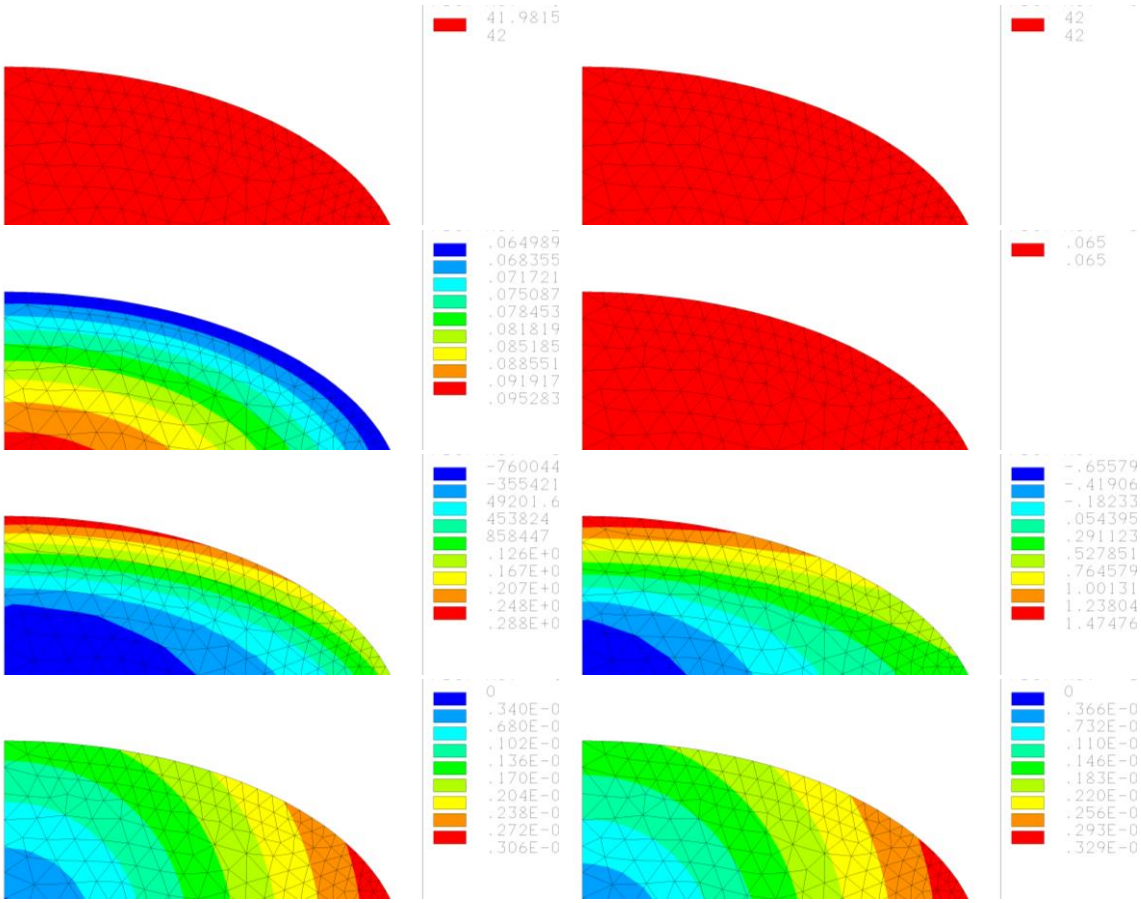
Figura 6. Campos de Pasankalla a los 30 min (izquierda) y a las 4 h (derecha): temperatura, humedad, esfuerzo principal y desplazamiento, por filas.



Fuente: Simulaciones propias en ANSYS Mechanical APDL 2024 R2.

En Pasankalla, la redistribución de humedad reduce la solicitación interna mientras permanece el desplazamiento. El mapa final de esfuerzo usa una escala distinta de la del primer estado.

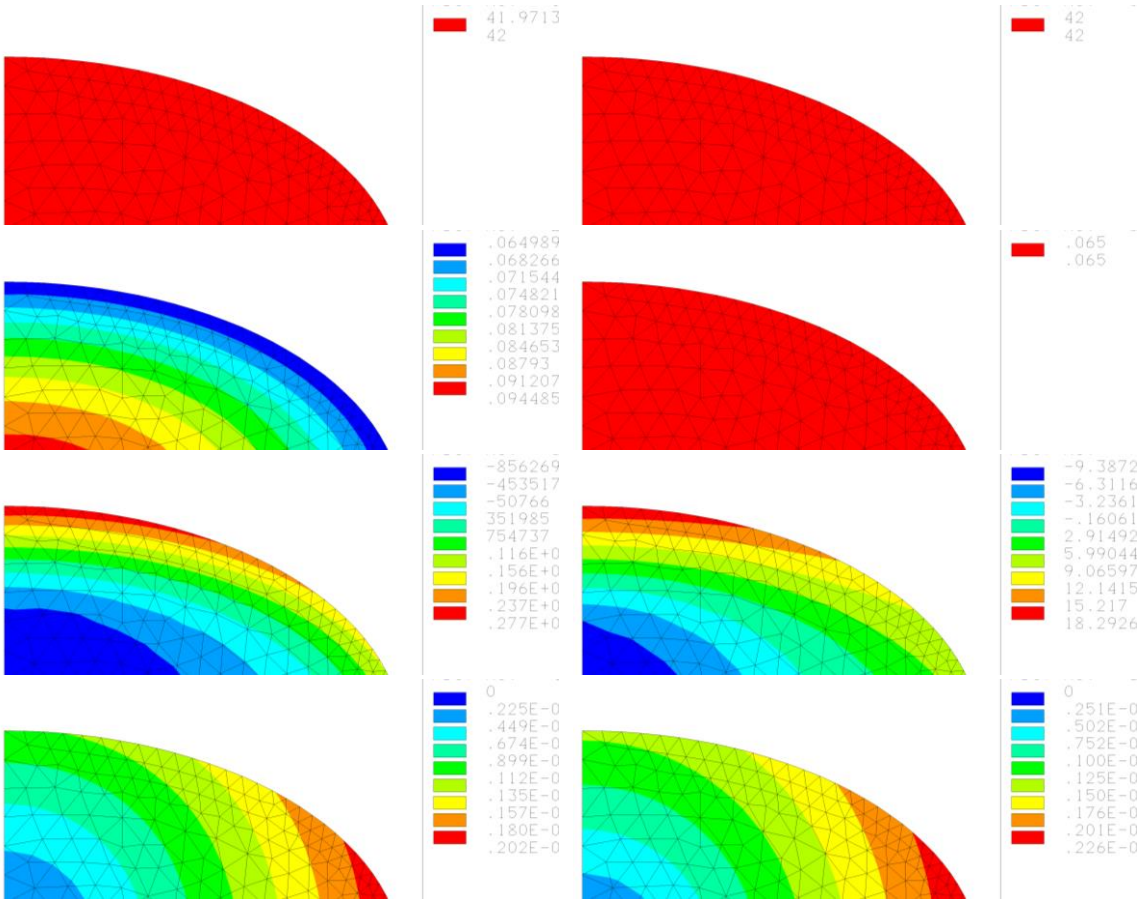
Figura 7. Campos de Huariponcho a los 30 min (izquierda) y a las 4 h (derecha): temperatura, humedad, esfuerzo principal y desplazamiento, por filas.



Fuente: Simulaciones propias en ANSYS Mechanical APDL 2024 R2.

Huariponcho reúne el menor tamaño y la mayor humedad inicial asignados. Su desplazamiento final es el mayor del conjunto, aunque su esfuerzo máximo no lo es.

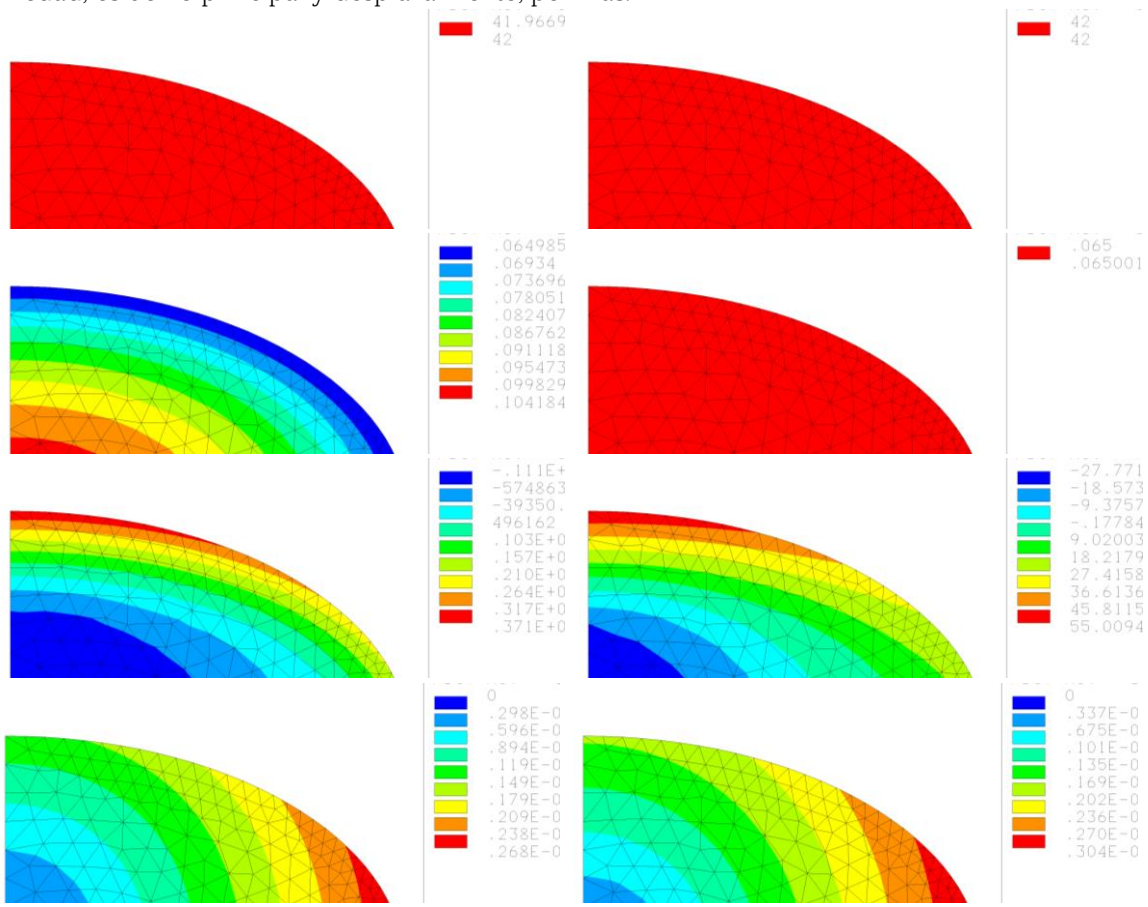
Figura 8. Campos de Chucapaca a los 30 min (izquierda) y a las 4 h (derecha): temperatura, humedad, esfuerzo principal y desplazamiento, por filas.



Fuente: Simulaciones propias en ANSYS Mechanical APDL 2024 R2.

Chucapaca presenta las menores solicitaciones mecánicas de la comparación. Su menor reducción porcentual de humedad debe interpretarse desde la humedad inicial, no como un secado incompleto.

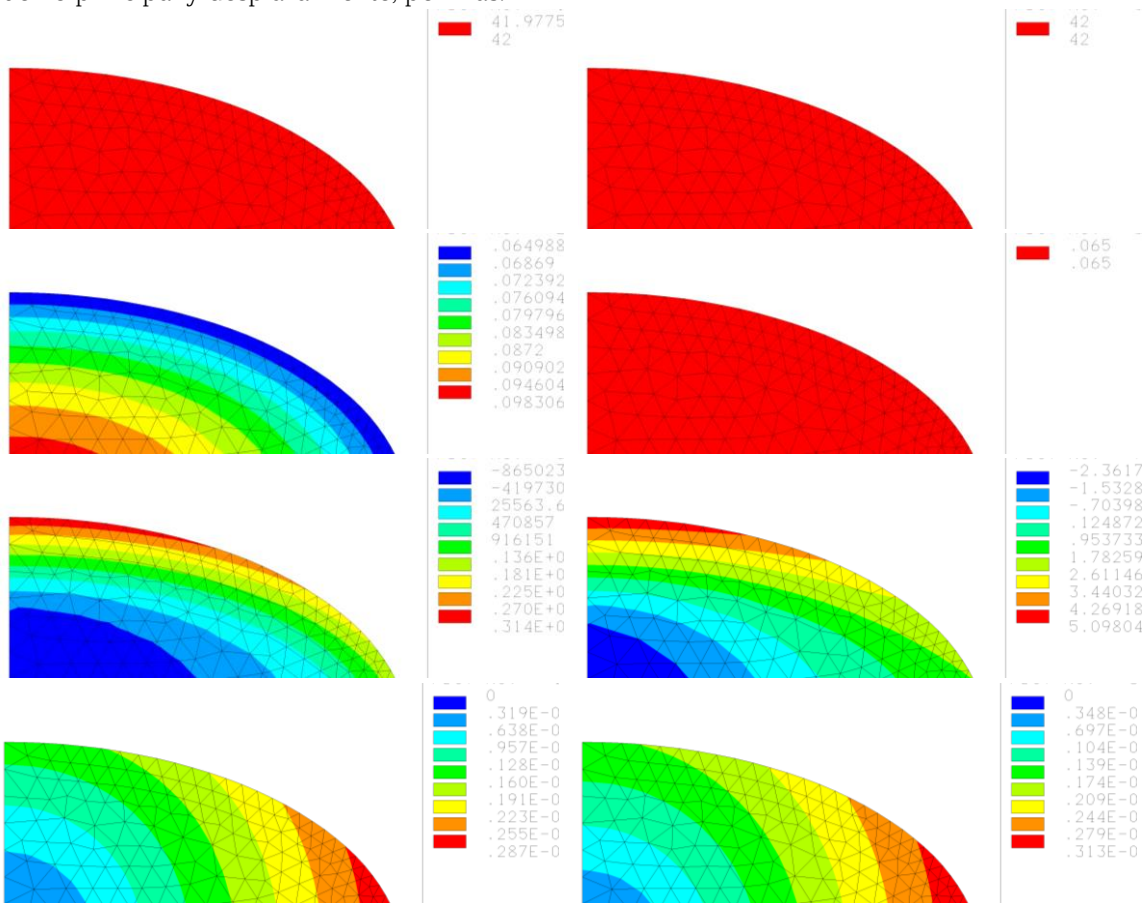
Figura 9. Campos de Jach'a Grano a los 30 min (izquierda) y a las 4 h (derecha): temperatura, humedad, esfuerzo principal y desplazamiento, por filas.



Fuente: Simulaciones propias en ANSYS Mechanical APDL 2024 R2.

El escenario exploratorio de Jach'a Grano produce el mayor esfuerzo registrado. Este resultado identifica un caso para calibración posterior, sin establecer una propiedad mecánica medida del cultivar.

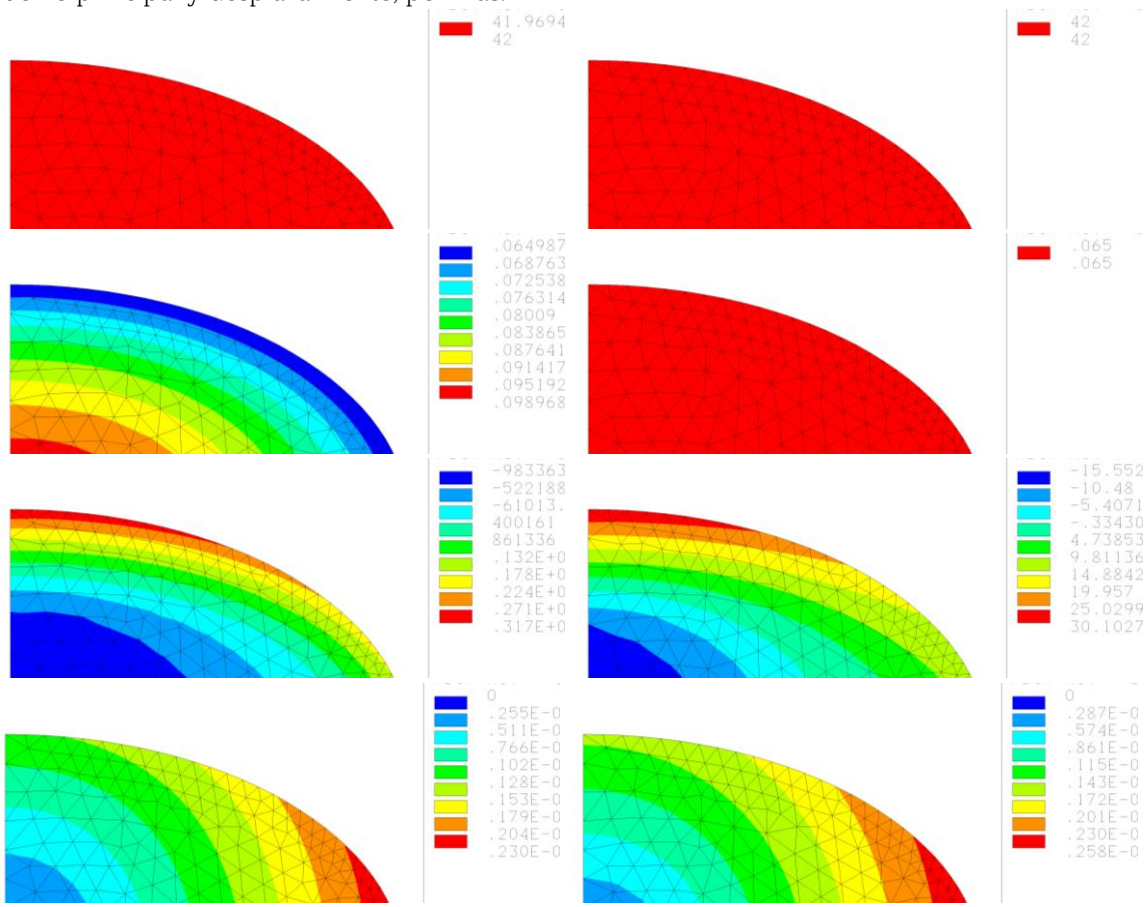
Figura 10. Campos de Kurmi a los 30 min (izquierda) y a las 4 h (derecha): temperatura, humedad, esfuerzo principal y desplazamiento, por filas.



Fuente: Simulaciones propias en ANSYS Mechanical APDL 2024 R2.

El escenario exploratorio de Kurmi combina alta humedad inicial con una geometría pequeña. La elevada contracción final no implica que haya experimentado la mayor solicitación de esfuerzo.

Figura 11. Campos de Blanquita a los 30 min (izquierda) y a las 4 h (derecha): temperatura, humedad, esfuerzo principal y desplazamiento, por filas.

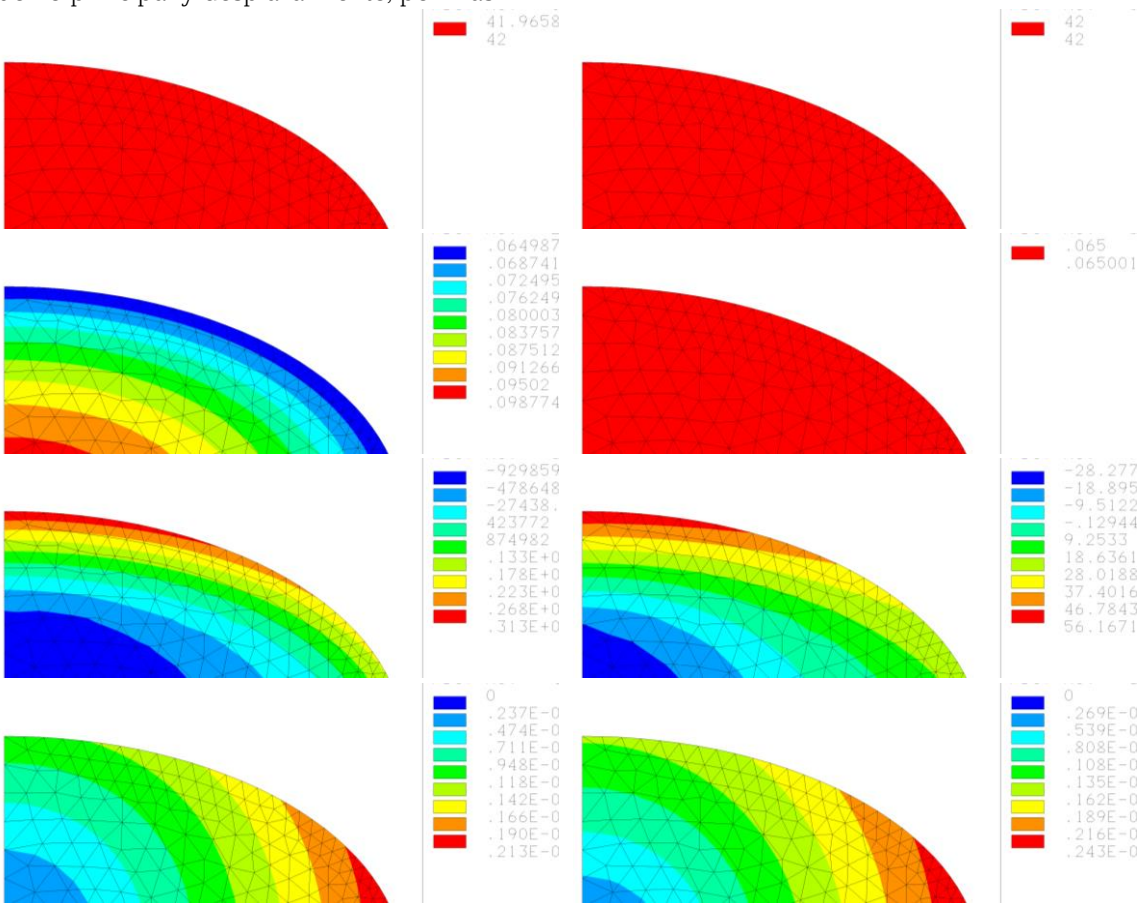


Fuente: Simulaciones propias en ANSYS Mechanical APDL 2024 R2.

Blanquita y Quinua Real comparten la reducción relativa de humedad, pero no sus campos mecánicos.

Esa coincidencia de un indicador global no hace equivalentes ambos escenarios.

Figura 12. Campos de Toledo a los 30 min (izquierda) y a las 4 h (derecha): temperatura, humedad, esfuerzo principal y desplazamiento, por filas



Fuente: Simulaciones propias en ANSYS Mechanical APDL 2024 R2.

El escenario exploratorio de Toledo conserva contracción al final y presenta menor esfuerzo que Jach'a Grano. La comparación queda condicionada por sus parámetros de entrada y necesita mediciones específicas.

Discusión de los hallazgos

Los resultados sostienen que una mayor reducción porcentual de humedad no identifica por sí sola el caso más eficiente ni el de mayor esfuerzo. Con un equilibrio común, ese porcentaje está condicionado por el contenido inicial. Gely y Santalla (2007) encontraron dependencia de la difusividad respecto de la temperatura y la humedad inicial; nuestros resultados son compatibles con la necesidad de considerar esas entradas, pero el diseño utilizado no separa sus efectos individuales. La coincidencia entre Quinua Real y Blanquita en reducción relativa, acompañada de campos mecánicos distintos, muestra la limitación de ordenar los casos únicamente por agua retirada.

Luisetti et al. (2023) describieron el secado convectivo de Hualhuas con un modelo de Fick ajustado a ensayos a 40, 60 y 80 °C. La aproximación de nuestras curvas al equilibrio concuerda cualitativamente con ese marco difusivo. Sin embargo, aquellos autores estimaron y validaron parámetros con datos experimentales, mientras aquí se comparan entradas prescritas. Por ello, el acuerdo entre DOLFINx y ANSYS respalda la consistencia computacional, pero no demuestra una precisión experimental superior a la de su modelo.

Torrez Irigoyen y Giner (2017) combinaron transferencia de masa y energía para el secado-tostado de quinua remojada entre 80 y 140 °C. Compartimos la necesidad de considerar ambos transportes; la diferencia es que este manuscrito resuelve campos espaciales y añade una respuesta mecánica a 42 °C. Ese aporte permite distinguir la solicitación transitoria de la contracción final. Las diferencias de temperatura, tratamiento y formulación impiden trasladar directamente sus parámetros cinéticos a los ocho casos estudiados.

Gutiérrez-Rodríguez et al. (2024) observaron que el pretratamiento con etanol aceleró el secado inicial de quinua germinada a 50 °C. Khan et al. (2025) estudiaron granos JQ-778 germinados y tratados con ultrasonido, secados entre 50 y 70 °C. Estos resultados muestran que el tratamiento del grano cambia la cinética que debe representarse. Nuestros casos no incluyen germinación, etanol ni ultrasonido; sus curvas no contradicen esos trabajos ni permiten comparar ahorros energéticos. Una extensión del modelo deberá medir los cambios de transporte y contracción producidos por cada pretratamiento.

La disminución del esfuerzo al uniformarse la humedad es cualitativamente coherente con la relación entre gradientes y fisuración del arroz discutida por Cnossen et al. (2003) y Dong et al. (2010). El contraste apoya el mecanismo considerado, pero no aporta una resistencia a fractura para quinua. La postura que permiten defender los datos es más concreta: esfuerzo máximo y desplazamiento final describen solicitaciones diferentes y deben evaluarse por separado. Identificar Jach'a Grano por esfuerzo y Huariponcho por desplazamiento es útil para seleccionar ensayos, no para afirmar que una variedad se romperá antes que otra.

Li et al. (2023) combinaron elementos discretos y finitos para estudiar un lecho de soja, donde la porosidad y la circulación de aire también condicionan el secado. Esa escala explica por qué un modelo de grano aislado no basta para establecer el rendimiento de un secador. En este trabajo permanecen pendientes la calibración por cultivar, la inclusión del calor de evaporación, la conversión del coeficiente térmico normalizado a propiedades físicas y la convergencia espacial y temporal. El primer registro a 30 min limita la localización del máximo temprano. Estas condiciones delimitan la interpretación de los resultados sin invalidar la comparación realizada.

CONCLUSIONES

La implementación en DOLFINx y su contraste con ANSYS producen estados finales próximos, con diferencias transitorias y mecánicas que impiden tratarlos como soluciones localmente equivalentes. El resultado respalda la comparación computacional; la validación predictiva requiere ensayos y convergencia.

La comparación térmica e higroscópica muestra que los ocho casos se aproximan al equilibrio prescrito. La reducción relativa está condicionada por la humedad inicial y no demuestra, por sí sola, mayor eficiencia de secado. La interpretación debe considerar las trayectorias y el conjunto de entradas de cada caso.

Los campos mecánicos distinguen a Jach'a Grano por el mayor esfuerzo registrado y a Huariponcho por el mayor desplazamiento final. Las solicitaciones más altas de las series corresponden al primer estado guardado. Esos casos orientan la selección de ensayos; determinar el máximo temprano y el riesgo de fisuración exige mayor resolución temporal y resistencia experimental por cultivar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS, Inc. (2024). *Mechanical APDL theory reference and element reference, release 2024 R2*. ANSYS, Inc.

Baratta, I. A., Dean, J. P., Dokken, J. S., Habera, M., Hale, J. S., Richardson, C. N., Rognes, M. E., Scroggs, M. W., Sime, N., y Wells, G. N. (2023). *DOLFINx: The next generation FEniCS problem solving environment* [Prepublicación]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.10447666

Cnossen, A. G., Jiménez, M. J., y Siebenmorgen, T. J. (2003). Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures. *Journal of Food Engineering, 59*(1), 61-69. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00431-4

Dong, R., Lu, Z., Liu, Z., Koide, S., y Cao, W. (2010). Effect of drying and tempering on rice fissuring analysed by integrating intra-kernel moisture distribution. *Journal of Food Engineering, 97*(2), 161-167. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.005

Gely, M. C., y Santalla, E. M. (2007). Moisture diffusivity in quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds. *Journal of Food Engineering, 78*(3), 1029-1033. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.015

Geuzaine, C., y Remacle, J.-F. (2009). Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering, 79*(11), 1309-1331. https://doi.org/10.1002/nme.2579

Gutiérrez-Rodríguez, C., Tello-León, G., y Miano, A. C. (2024). Using ethanol as pretreatment for improving drying of germinated quinoa grains. *Journal of Cereal Science, 120*, 104042. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.104042

Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal [INIAF]. (2024). *Registro Nacional de Variedades y de Variedades Protegidas 2024.* https://iniaf.gob.bo/wp-content/uploads/2024/10/REGISTRO-NACIONAL-DE-VARIEDADES-Y-DE-VARIEDADES-PROTEGIDAS-2024.pdf

Khan, J., Gul, P., Li, Q., y Liu, K. (2025). Drying kinetics and thermodynamic analysis; enhancing quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) quality profile via pre-treatments assisted germination and processing. *Ultrasonics Sonochemistry, 117*, 107337. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107337

Li, X., Yang, K., Wang, Y., y Du, X. (2023). Simulation study on coupled heat and moisture transfer in grain drying process based on discrete element and finite element method. *Drying Technology, 41*(12), 2027-2041. https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2213767

Londoño Fuentes, J. (2007). *Integridad estructural en el secado de arroz en lecho fluidizado* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes].

Luisetti, J., Balzarini, M. F., y Ciappini, M. C. (2023). Estimation of effective water vapour diffusion and mass transfer during quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) drying. *Agronomía Colombiana, 41*(2), e108843. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v41n2.108843

Osorio Osorio, C. M. (2009). *Análisis en coordenadas cilíndricas de la integridad estructural de un grano de arroz sometido a proceso de secado en lecho fluidizado* [Trabajo de grado, Universidad de los Andes]. https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstreams/65064b09-444a-47f3-9c30-0f7231613564/download

Torrez Irigoyen, R. M., y Giner, S. A. (2017). Modeling thin layer drying-roasting kinetics of soaked quinoa. Coupled mass and energy transfer. *Biosystems Engineering, 157*, 99-108. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.03.003

Vilche, C., Gely, M., y Santalla, E. (2003). Physical properties of quinoa seeds. *Biosystems Engineering, 86*(1), 59-65. https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00114-4