



EFICIENCIA DE RIEGO EN SISTEMAS LOCALIZADOS

Alejandro Antunez B.
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.
INIA La Platina

Sofía Felmer E.
Ingeniero Agrónomo
INIA Rayentué

David Mora L.
Ingeniero Agrónomo
INIA Rayentué

1. INTRODUCCIÓN

En zonas en que la restricción de recursos hídricos es relevante, como es el caso del secano de la zona central de Chile, es importante conocer los parámetros físico-hídricos de los suelos, con el fin de evaluar tecnologías y el manejo del los sistemas, detectando causas de posibles deficiencias en la utilización del agua de riego.

La caracterización hídrica de los suelos consiste en la determinación y análisis de los parámetros físicos del sustrato, que tienen relación con la retención, infiltración y disponibilidad de agua para las plantas. Una vez analizados estos parámetros, es posible determinar frecuencias y tiempos de riego, advirtiendo incluso problemas de diseño de los sistemas de riego utilizados, que pueden afectar directamente la eficiencia de aplicación del agua.

En general, la eficiencia con que los agricultores aplican el agua de riego depende de dos factores: el manejo del agua durante el riego, y las características hídricas del suelo que se está regando.



Las pérdidas o ineficiencias del sistema de riego se relacionan con el manejo del agua y con las características físico-hídricas del suelo a regar. Entre los factores de manejo que influyen en la eficiencia de riego se encuentran el diseño del sistema, los caudales de riego utilizados, la frecuencia y el tiempo de riego empleado. Por otra parte, entre los factores del suelo destacan la velocidad de infiltración del agua, la capacidad de retención de agua, la densidad aparente y la profundidad del suelo y sus condiciones de estratificación (Gurovich, 1997).

Esta interacción entre el manejo del agua de riego y las características hídricas del suelo, determina la eficiencia de utilización del agua de riego. Por lo anterior, es importante definir eficiencia de riego y sus componentes.

2. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA DE RIEGO

La eficiencia en el uso del agua de riego a nivel intrapredial, se integra a partir de la determinación de tres subcomponentes, que incluye las pérdidas de éste recurso desde su aplicación, uniformidad y almacenamiento en el suelo. Para maximizar la eficiencia en el uso del recurso, es importante definir estos componentes, incluyendo técnicas y recomendaciones para optimizar el uso del agua a nivel intrapredial.

La eficiencia de aplicación de agua determina directamente la superficie factible de regar sin causar déficit hídrico al cultivo. De esta forma, en términos generales, dado cierto caudal disponible, la superficie máxima a regar a partir de esta fuente puede



Llegar a duplicarse al cambiar de riego por surcos a riego por goteo, por ejemplo. Esta condición es determinante en la inclinación de los productores de áreas con severas restricciones de recursos hídricos, a invertir en sistemas de riego presurizados del tipo goteo o microaspersión. Aún cuando los sistemas de riego por goteo alcanzan eficiencias teóricas del orden del 90% al 95%, en la práctica un mal manejo del riego puede ocasionar una merma relevante en el desempeño del sistema, con pérdidas de agua de diversa naturaleza.

Ejemplo 3. Cálculo de la máxima superficie posible de regar

Para la zona de Litueche, la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) para el mes de diciembre es de 180 mm (Santibáñez y Uribe, 1993), equivalente a una demanda diaria de 5,8 mm/día. Para el cultivo de frutillas, con un K_c para el mismo mes equivalente a 0,85, representa una evapotranspiración del cultivo (ET_c) o lámina neta de 4,93 mm/día.

La lámina neta equivale a la altura de agua que debe ser repuesta en el suelo, para satisfacer los requerimientos de evapotranspiración del cultivo de frutillas. Para regar adecuadamente, esta altura de agua debe compensarse por la eficiencia del sistema de riego. Si en teoría, un sistema de riego por goteo alcanza un 90% de eficiencia, la lámina bruta a aplicar en el cultivo de frutillas será equivalente a 5,48 mm/día. Esta demanda bruta equivale a un caudal continuo de 0,634 L/s/ha (5,48 mm/día x 0,115741). De esta forma, es posible determinar la superficie máxima a regar, dado un cierto cultivo, localidad y caudal disponible (**Cuadro 12**).



Cuadro 12. Máxima superficie regable de frutillas por goteo con 90% de eficiencia a partir de cierto caudal disponible, en la localidad de Litueche, Región de O'Higgins.

| Q disp. (L/s) | Sup. Regable (ha) |
|---------------|-------------------|
| 0,5 | 0,9 |
| 1,0 | 1,8 |
| 1,5 | 2,6 |
| 2,0 | 3,5 |
| 2,5 | 4,4 |
| 3,0 | 5,3 |
| 5,0 | 8,8 |
| 10,0 | 17,6 |

De acuerdo al Cuadro 12 y considerando un caudal 0,634 L/s/ha, del ejemplo planteado, entonces la máxima superficie posible de regar será de 1,14 ha ($0,634 \times 0,9 / 0,5$).

Este sencillo cálculo, cobra gran relevancia en la toma de decisiones de los productores en zonas de secano, limitando la superficie a plantar sin causar déficit hídrico en el cultivo. Cabe destacar, que si la eficiencia cae por debajo del 90% estimado para el riego por goteo, la superficie regable a partir del caudal disponible puede llegar a ser considerablemente menor, con importantes pérdidas de rendimiento y calidad en el cultivo, comprometiendo incluso la viabilidad del cultivo en secano.

Es importante destacar que la mayor parte de los sistemas de riego, no funcionan con la eficiencia óptima de cada método. Por ejemplo, estudios intraprediales en Estados Unidos han demostrado que, en promedio, cerca del 25% de la energía eléctrica empleada en sistemas de riego está siendo mal aprovechada, debido a bajas eficiencias de bombeo o del motor de la bomba.



El riego excesivo también representa una pérdida de energía y dinero y, frecuentemente, los problemas del equipo tienden a estar acompañados de problemas de manejo. Un equipo mal diseñado, ineficiente o con problemas de mantención disminuye el control que ejerce el regador sobre la forma de aplicación del agua. Problemas como calidad del agua o falta de presión en los laterales hacen imposible reponer adecuadamente el agua en el suelo, conduciendo a estrés hídrico en los cultivos, disminución de rendimientos, pérdidas de agua, escorrentía superficial, erosión de suelo, y muchos otros problemas derivados.

En terreno, se ha verificado que en general hay poco control sobre la presión de trabajo en los laterales de riego, lo que afecta directamente al caudal entregado por los emisores (cintas de riego, goteros, microaspersores, microjets). La sencilla práctica de medir a lo largo de la temporada la presión por medio de un manómetro en los extremos de las laterales de distinta posición topográfica dentro de un sistema de riego, permite detectar a tiempo problemas que pueden determinar pérdidas de agua y de rendimiento del cultivo (**Foto 6**).



Foto 6. Medición de presión en la lateral por medio de un manómetro de glicerina.



En predios de productores de arándano y frutilla en el secano de la Región de O'Higgins, se han registrado presiones de funcionamiento cercanas al 50 – 70% de la presión óptima de funcionamiento del emisor, lo que inevitablemente determina menores caudales entregados por tiempo de funcionamiento del sistema y una baja eficiencia de riego.

En términos de sus componentes, la eficiencia de riego puede definirse como la resultante de la ponderación de tres subaspectos:

- **Eficiencia de aplicación:** determina la fracción de agua no retenida en la zona radical, en relación al agua aplicada en el perfil de suelo.
- **Eficiencia de almacenamiento:** determina la fracción de agua aplicada almacenada en el suelo, en relación a la necesaria, para llevar a capacidad de campo el perfil.
- **Eficiencia de uniformidad:** evalúa el grado de uniformidad de la lámina de riego aplicada en terreno.

La ponderación de estas tres eficiencias, determina la **eficiencia agronómica o de utilización** del agua de riego, cuyo valor debería optimizarse en condiciones de secano. En consecuencia, la eficiencia de riego es una variable dinámica que depende de los factores antes mencionados, sin contar con el mal manejo por parte del regante, derivados de su escasa capacitación o experiencia en el cultivo. De este modo, la eficiencia de utilización fluctúa no sólo a lo largo de la temporada en cada evento de riego, sino que también en cada sector y subsector de riego dentro de un sistema.

El concepto de eficiencia agronómica está definido por la siguiente ecuación:



$$E_a = \frac{E_{ap} + E_{al} + E_u}{3}$$

Ecuación 7

Donde:

 E_a : Eficiencia agronómica E_{ap} : Eficiencia de aplicación E_{al} : Eficiencia de almacenamiento E_u : Eficiencia de uniformidad

2.1. Eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación es la relación entre el volumen de agua que es necesario reponer en la zona de raíces y el volumen total de agua aplicado al terreno que queda retenida en la zona radical del cultivo y está determinada por la siguiente expresión:

$$E_{ap} = \frac{h_a - h_p}{3}$$

Ecuación 8

Donde:

 E_{ap} : Eficiencia de aplicación h_a : Agua aplicada durante el riego (L)

h_p : Agua no retenida en la zona radical (L) y que por lo tanto, no se encuentra disponible para el consumo por parte de los cultivos

En el **Cuadro 13**, se muestran los valores de eficiencia para algunos sistemas de riego utilizados comúnmente.

Las pérdidas de agua en un sistema de riego por surcos están alrededor del 55%, comparado con un sistema de riego por go-



teo donde las pérdidas pueden alcanzar el 10%, siempre y cuando el mismo se encuentre bien diseñado. Lo anterior queda esquematizado en la **Figura 23**.

Cuadro 13. Eficiencia de aplicación del agua según el método de riego utilizado.

| Método de riego | Eficiencia de riego (%) |
|-----------------|-------------------------|
| Tendido | 30 |
| Surcos | 45 |
| Californiano | 65 |
| Aspersión | 75 |
| Microjet | 85 |
| Microaspersión | 85 |
| Goteo | 90 |

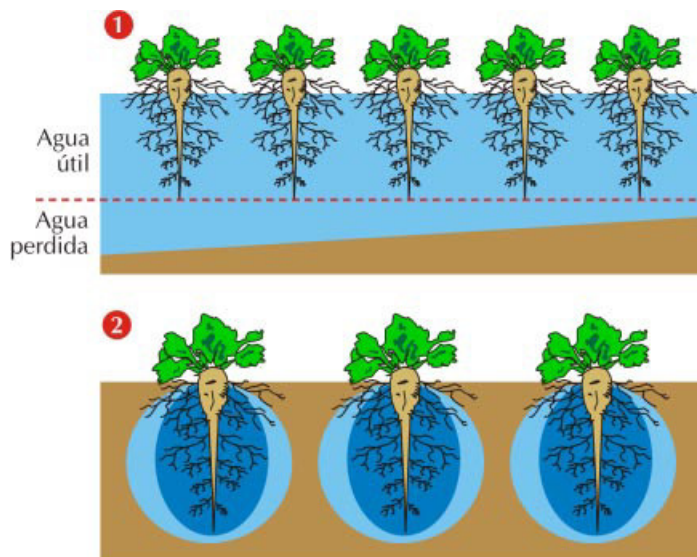


Figura 23. Eficiencia de riego. 1) Riego por surco; 2) Riego por goteo.



Los sistemas de riego localizado tienen eficiencias muy altas, 90% o más, por lo que su uso se ha generalizado en todas aquellas zonas con problemas en la seguridad de riego. Otra ventaja es que todas las plantas reciben la misma cantidad de agua y nutrientes, por lo tanto, se favorecen todas las condiciones para que el cultivo exprese todo su potencial productivo.

Si el riego no es uniforme, algunas zonas recibirán más agua de la necesaria y se perderá por percolación profunda, otras plantas recibirán menos y eso afectará negativamente la productividad de esa planta. Lo anterior se puede observar en la **Figura 24**.

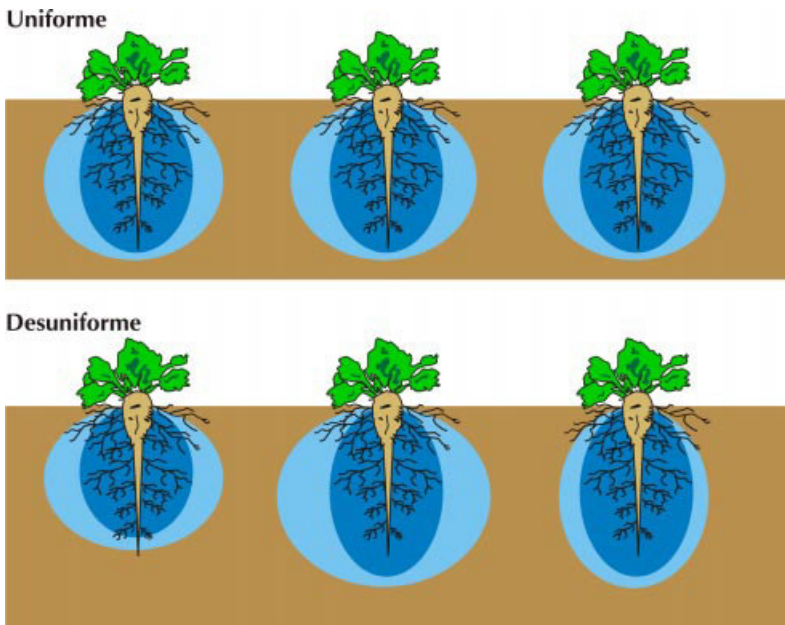


Figura 24. Mojamiento uniforme *versus* mojamiento desuniforme en un sistema de riego presurizado.



Ejemplo 4. Cálculo de la Eficiencia de Aplicación (E_{ap})

Tradicionalmente en frutillas para el período de máxima demanda se recomienda reponer la lámina de agua evapotranspirada el día anterior (riego diario) o bien efectuar un riego al acumularse 10 mm de evapotranspiración del cultivo y reponer esta altura para devolver el suelo a capacidad de campo. Una lámina neta de 10 mm, representa 10 L/m² ó 100 m³/ha de agua. Si un riego aplicado a este cultivo descarga por ejemplo 12 L/m² (h_a), es decir, un exceso de 2 L/m² (h_p) de agua por sobre los 10 L/m² requeridos, esta agua percola más allá de la zona de raíces, representando una ineficiencia en la aplicación del riego, quedando definida por la siguiente relación:

$$E_{ap} = \frac{12 - 2}{12} \times 100 = 83\%$$

De esta forma, la E_{ap} cuantifica la fracción de agua que se retiene en la zona de raíces y que contribuye a satisfacer los requerimientos de evapotranspiración del cultivo. El complemento de esta eficiencia al 100%, equivalente en el ejemplo a un 17% representa a su vez la fracción no retenida en la zona de raíces. Esta fracción de agua tiene implicancias en el transporte de nutrientes y pesticidas a las napas subterráneas, que lentamente pueden lixiviar compuestos nocivos para la salud humana y el ambiente tales como nitratos o glifosatos, por ejemplo.

Se debe tener en cuenta que la eficiencia de aplicación considerada para los distintos métodos de riego (aspersión, goteo, microjet) es sólo teórica, por lo tanto en la práctica estos valores



pueden ser mucho menores a los asignados, ahí la importancia de su determinación *in situ*.

Esta eficiencia se ha definido en base a láminas de agua, que es la forma como se expresa habitualmente la cantidad de agua de riego aplicada a un campo regado.

La lámina de entrada (*ha*) corresponde a la cantidad total de agua que se hace entrar al sector de riego durante el tiempo que dura esta práctica. La lámina de pérdida está representada por dos procesos de flujo:

- a) La cantidad total de agua que sale del sector de riego por escurrimiento superficial y no tiene posibilidad de infiltrar en el perfil.
- b) La cantidad total de agua que sale del sector de riego por percolación bajo la zona de arraigamiento del cultivo y no queda a disposición de las plantas.

Si bien este concepto no indica si el riego es satisfactorio desde el punto de vista de una práctica agronómica (puesto que al agregar un litro de agua a una hectárea de suelo relativamente seco, se tendría una eficiencia de aplicación del 100%, dado que no se producirían pérdidas de ningún tipo), es el parámetro que indica la proporción de la lámina (o volumen) total que se aplica por unidad de superficie, que se utiliza efectivamente para regar el suelo, esto es, para reponer en el perfil del suelo ocupado por las raíces, el agua evapotranspirada desde el evento de riego anterior.

2.2. Eficiencia de almacenamiento

Se define como la relación entre el agua almacenada en el perfil por efecto del riego, y el agua necesaria para llevar dicho perfil a



Capacidad de Campo en toda la profundidad de arraigamiento del cultivo, lo cual se puede determinar de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E_{al} = \frac{h_{al}}{h_{cc}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

E_{al} : Eficiencia de almacenamiento.

h_{al} : Agua almacenada en la zona de las raíces al finalizar el riego

h_{cc} : Agua requerida para que el perfil del suelo quede a capacidad de campo hasta la profundidad de raíces.

Ejemplo 5.

Cálculo de la Eficiencia de Almacenamiento (E_{al})

Volviendo al ejemplo de riego en frutillas, se requiere reponer una altura de agua de 10 mm, para devolver el suelo a capacidad de campo (h_{cc}). Si una vez efectuada la labor de riego se verifica que el agua almacenada en el perfil de suelo equivale a 8 mm (h_{al}), la eficiencia queda determinada de acuerdo a la siguiente relación:

$$E_{al} = \frac{8}{10} \times 100 = 80\%$$

Para un suelo con una velocidad de infiltración determinada, la lámina de agua almacenada en su perfil dependerá del tiempo de riego. La lámina necesaria para llevar el perfil hasta la profundidad de arraigamiento del cultivo, a un contenido de agua equivalente a capacidad de campo (CdC), depende también del contenido de agua del suelo antes del riego.



En este caso, tampoco una eficiencia de almacenamiento del 100% indica un riego adecuado, ya que es posible llevar el perfil del suelo hasta capacidad de campo, pero con una pérdida por escurrimiento superficial y/o por percolación profunda.

2.3. Eficiencia de uniformidad

Se define como la relación entre el promedio de las láminas almacenadas en el perfil del suelo a lo largo del campo regado, y la desviación de dicho promedio, para un número específico de muestreos (**ecuación 10**).

$$E_u = \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{|X_i - \bar{X}|}{n \times \bar{X}} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

- E_u : Eficiencia de Uniformidad (%)
- \bar{X} : Promedio de caudales registrados (l/h)
- $|X_i - \bar{X}|$: Valor absoluto de la desviación de las observaciones individuales con respecto al promedio de caudales registrados
- n : número de observaciones

En la práctica del riego es muy importante que la distribución del agua en la zona de raíces sea uniforme, ya que la respuesta de distribución desigual da lugar a que el terreno presente excesos de agua en algunas partes y déficit en otras.

Para determinar la eficiencia de uniformidad se debe elegir un número determinado de emisores distribuidos uniformemente dentro del sector de riego, se recomienda muestrear sobre 16 emisores por sector.



Primero se eligen los laterales de los extremos y dos de la parte media ubicados en el primer y segundo tercio del sector. Se sigue la misma consideración para la elección de los emisores dentro de los laterales seleccionados, de acuerdo a la **Figura 25**.

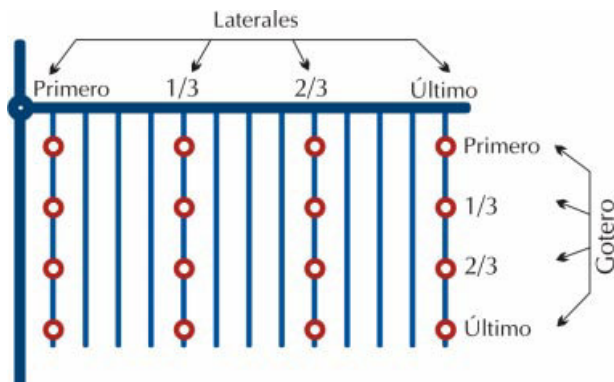


Figura 25. Elección de emisores a muestrear para la determinación de la E_u .

Una vez seleccionados los emisores a muestrear, en un envase, se medirá el gasto de cada gotero, en un tiempo determinado, de 2 a 5 minutos (**Foto 7**).



Foto 7. Muestreo del gasto de emisores.



El tiempo de medición será el mismo para todos los goteros muestreados (**Foto 8**).

Con un recipiente graduado se medirá el volumen contenido por cada envase (**Foto 9**).



Foto 8. Registro del tiempo de medición.



Foto 9. Medición de caudales muestreados.

Con los datos obtenidos de cada muestra se realizan los cálculos aplicando la **ecuación 10**. En el **Cuadro 14**, se presenta la clasificación para los diferentes valores de Eficiencia de Uniformidad.

Cuadro 14. Clasificación de la Eficiencia de Uniformidad de acuerdo a diferentes intervalos de valores.

| Categoría | Valor E_u (%) |
|-------------|-----------------|
| Excelente | 90 – 100 |
| Buena | 80 – 90 |
| Aceptable | 70 – 80 |
| Inaceptable | Menos de 70 |



Ejemplo 6. Cálculo de la Eficiencia de Uniformidad (E_u)

Continuando con los ejemplos planteados con anterioridad, se tienen 2 sectores de riego muestreados, donde se registraron los caudales de 10 emisores por sector y la presión promedio de los laterales de riego por sector, los resultados se presentan a continuación:

| Nº goteros | SECTOR 3 | | SECTOR 8 | |
|--------------------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
| | Q (L/h) | $ X_i - \bar{X} $ | Q (L/h) | $ X_i - \bar{X} $ |
| 1 | 3,0 | 0,08 | 2,4 | 0,68 |
| 2 | 3,0 | 0,08 | 2,4 | 0,68 |
| 3 | 3,3 | 0,22 | 3,6 | 0,52 |
| 4 | 3,6 | 0,52 | 3,0 | 0,08 |
| 5 | 3,0 | 0,08 | 2,1 | 0,98 |
| 6 | 3,0 | 0,08 | 3,6 | 0,52 |
| 7 | 1,8 | 1,28 | 2,1 | 0,98 |
| 8 | 3,8 | 0,70 | 4,8 | 1,72 |
| 9 | 3,0 | 0,08 | 2,1 | 0,98 |
| 10 | 3,3 | 0,22 | 3,6 | 0,52 |
| X | 3,1 | | 2,97 | |
| $\sum_{i=1}^n X_i - \bar{X} $ | 3,3 | | 7,7 | |
| E_u (%) | 89 | | 74 | |
| Presión (bar) | 0,78 | | 0,76 | |
| Q nominal | | 4 (L/h) | | |

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que la eficiencia de uniformidad del sistema en cuestión, se puede clasificar como BUENA para el Sector 3, y ACEPTABLE para el Sec-



tor 8. Promediando la E_u de ambos sectores se obtiene un 82%, clasificándose como BUENA para el sistema en general.

Al respecto, se debe prestar especial atención al caudal (Q) nominal de los emisores utilizados y compararlo con el promedio obtenido de las evaluaciones realizadas, ya que una óptima eficiencia de aplicación no asegura que se estén descargando los caudales asegurados por catálogo, por lo cual el registro de presiones en las laterales de riego será un parámetro que podrá explicar las posibles diferencias entre el caudal real y el caudal nominal de los emisores. Además, la magnitud en la diferencia de caudal teórico y real, estará determinada por el tipo de emisores utilizados, sean estos de tipo turbulento o autocompensados; y por la presión de trabajo requerida por emisor.

En los casos evaluados, al comparar el caudal promedio por sector y el caudal nominal de los emisores utilizados se presenta una situación que contrasta con la eficiencia calculada. Aunque la E_u está dentro de los márgenes óptimos en todos los casos, se debe prestar especial atención a los caudales descargados, presiones existentes en los laterales de riego, presión de trabajo de los emisores y tipo de emisores (convencionales o autocompensados).

En el presente ejemplo los caudales promedios descargados por sector se encuentran muy por debajo del caudal nominal de los emisores utilizados que corresponden a 4 L/h, lo cual puede ser debido a una falta de presión en los laterales de riego.

Para finalizar a continuación se presenta un ejemplo con el cálculo de la Eficiencia Agronómica:



Ejemplo 7. Cálculo de la Eficiencia Agronómica (E_a)

Una vez determinados los componentes de la Eficiencia Agronómica, se aplica la **ecuación 7**, obteniéndose:

$$E_a = \frac{83 + 80 + 82}{3} = 81,67\%$$

Por lo tanto, el sistema de riego evaluado, de acuerdo a los ejemplos planteados, posee una Eficiencia Agronómica de 81,67%.