



Efectos del ambiente sobre la pulverización de plaguicidas. Conceptos básicos de micrometeorología agrícola.

Ing. Agr. Marta Costanzo¹; Ing. Agr. MSc. Luis A. Carrancio²; Ing. Agr. Rubén A. Massaro².

¹ Cátedra de Climatología Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias, UNR. ² Desarrollo Rural, INTA EEA Oliveros.



Palabras clave: plaguicidas, pulverización, deriva, micrometeorología.

I. Introducción. Deriva.

Las pulverizaciones agrícolas están expuestas al efecto de factores meteorológicos, aún dentro de ciertos rangos de valores considerados óptimos o aceptables para tratamientos eficaces. El resultado de esos efectos es la pérdida del agua de las gotas, producida por evaporación y, consecuentemente, de los productos contenidos en el caldo.

El “desplazamiento de un plaguicida fuera del blanco determinado, transportado por masas de aire o por difusión” es definido como **deriva** según Norma ASABE S-327.1 de la American Society for Agricultural Engineers Standard. Es muy frecuente que se entienda como deriva sólo a “lo que se va fuera del lote pulverizado” y cause daño a algún cultivo cercano. La deriva puede ser interna en el lote o cultivo pulverizado (endoderiva) o externa al mismo (exoderiva). Este último tipo preocupa por el riesgo de afectar la salud de personas, animales o causar algún daño a cultivos cercanos (fitotoxicidad). Muchas veces se pulveriza con exoderiva y sus efectos son muy notorios como, por ejemplo, con el uso de herbicidas pero en otros casos los productos utilizados no permiten visualizar fácilmente su efecto (insecticidas, fungicidas) por lo cual la misma puede pasar desapercibida. (Massaro, R.A., 2013).

Hay dos formas de deriva directa de plaguicidas:

De partículas: movimiento de gotas de plaguicidas o partículas sólidas fuera del área tratada. Las gotas más gruesas se mueven a distancias cortas y caen cerca del punto de liberación. Las partículas más finas ($< 250 \mu$) pueden permanecer suspendidas en las corrientes de aire por mucho tiempo y pueden llegar lejos del área objetivo.

De vapor: movimiento de los plaguicidas en fase gaseosa fuera del área tratada. Es invisible y puede tener un impacto considerable. Las gotas se evaporan tanto en la aplicación como después de que se hayan secado en la superficie de la planta o en el suelo. La volatilización es la capacidad de un plaguicida de pasar a la fase gaseosa, a una presión y temperatura determinada y es la propiedad que más afecta el movimiento del plaguicida hacia la atmósfera después de ser aplicado.

La deriva de vapor depende más de las propiedades del ingrediente activo, la formulación (Ej.: ésteres) y las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa y viento) que del equipo utilizado, aunque es importante mencionar que las gotas pequeñas evaporan más rápidamente por tener mayor superficie expuesta (Graeme Tepper, 2017).



Se denomina **estado gaseoso** al estado de agregación de la materia en el cual las moléculas interaccionan débilmente, tendiendo a separarse. Cuando una sustancia en estado gaseoso puede pasar al estado líquido con pequeños cambios de temperatura o de presión, se denomina **vapor**. Cuando la sustancia requiere de cambios más importantes de temperatura o presión para licuarse, se llama **gas**. **Si se trata de agroquímicos en estado gaseoso, debemos hablar de vapor.**

Los vapores presentes en el aire se pueden mover mediante dos procesos:

Difusión gaseosa: es la distribución gradual de un vapor en el seno del aire por diferencia de gradiente de concentración; es rápido y aleatorio.

Dispersión: cuando las partículas o moléculas que se mueven en una dirección en forma concentrada, se mezclan y diluyen en otra masa de partículas, arrastradas por el viento.

La proporción de aspersión que llega al objetivo está influenciada, en gran parte, por las condiciones meteorológicas locales cerca de la superficie. Por lo tanto, se requiere tener información a escala micrometeorológica en superficie para comprender el efecto sobre el movimiento de las gotitas. Básicamente:

- Dirección y velocidad del viento.
- Temperatura y humedad del aire.
- Estabilidad o inestabilidad atmosférica, en relación al gradiente térmico vertical.

En la capa atmosférica más próxima al suelo ocurren procesos de intercambio de calor totalmente afectados por el sustrato geográfico. Predomina la mezcla turbulenta del aire, generada por el roce permanente con la superficie rugosa del suelo y por la elevación de burbujas de aire al calentarse (**convección**).

Esta influencia se hace sentir desde el suelo hasta la altura en donde deja de tener influencia la fricción; convencionalmente se le asigna un espesor de 600 a 800 m, pero puede oscilar entre una decena de metros a 1 ó 2 km, en función de la topografía, rugosidad de la superficie del suelo, advección de calor y humedad, y también de acuerdo al momento del día que se analice.

La turbulencia es mayor durante el día, originada en gran medida por el calentamiento desparejo de las superficies, que a su vez irradian calor al aire que está por encima de ellas, y éste al calentarse se vuelve menos denso y asciende, generando **co-**

rrientes convectivas que se combinan con el viento (desplazamientos horizontales o advectivos). Se reduce mucho durante la noche ya que la superficie va enfriándose al no recibir el calor del sol.

II. Velocidad y dirección del viento

Se define como **viento** al desplazamiento del aire en sentido horizontal, que puede tener cualquier orientación, pero que siempre es turbulento, desordenado y caótico. Se lo caracteriza por la **dirección** y la **velocidad**.

A nivel de pequeñas áreas (distrito, un establecimiento, un lote) toma importancia el efecto del rozamiento que sufre el viento cuando pasa sobre distintas superficies (rugosidad), como los cultivos (altura, densidad, distancia entre líneas), edificaciones, así como del intercambio de calor entre el aire y las distintas superficies sobre las que circula. El efecto de rozamiento afecta tanto la velocidad del viento (lo reduce) como su dirección.



Dirección: se expresa según el punto del horizonte desde donde proviene el viento. Se lo puede conocer mediante veletas o mangas catavientos.

Velocidad: calculada como la relación entre la distancia recorrida por un supuesto punto material de la masa de aire y el tiempo que se da en ese movimiento. Puede expresarse en m/s, km/h, nudos. Se lo puede conocer mediante el uso de anemómetros pendulares o de rotación. El primero de ellos da un valor estimativo de la velocidad del viento a la altura en que se ubica la veleta, mientras que el de rotación o de cazoletas da un valor cuantitativo.

El rozamiento del viento con la superficie terrestre disminuye con la altura, por lo tanto su velocidad siempre es mayor en altura que en superficie: esta característica determina que la tasa de incremento o gradiente anemométrico vertical sea siempre positiva.

Las gotas menores a 250μ son más propensas a la deriva por viento. Las gotas de 80μ o menos, flotan. Las gotas chicas caen más lentamente que las grandes, dado que la relación entre la superficie de rozamiento y el peso no es suficiente para vencer la resistencia del aire y son arrastradas por el viento o las corrientes convectivas (Tabla 1).

Pequeños cambios en el diámetro crean grandes diferencias en el peso de las gotas.

- Pasar de 150μ a 190μ de diámetro duplica el peso y volumen.
- Pasar de 150μ a 240μ de diámetro cuadruplica el peso y volumen.
- Pasar de 150μ a 300μ de diámetro aumenta peso y volumen 8 veces.



Tabla 1: Influencia de la velocidad del viento y del tamaño de las gotas en la distancia recorrida (elaborado por Carrancio, L., 2016).

Distancia recorrida en m, según tamaño de gota y velocidad del viento (se supone que no existe evaporación de las gotas)

Diámetro (μ)	Velocidad del viento km/h			
	5	10	15	20
100	24	48	72	96
200	9	18	26	35
400	5	9	14	18
500	4	7	10	14

Para una gota pulverizada de determinado tamaño, a mayor velocidad del viento, más lejos será transportada; a mayor tamaño de gota, ésta será menos afectada por el viento y caerá más rápido. Es importante destacar que muchas gotas se evaporan antes de caer, quedando en el aire en forma de vapor.



T2

Tabla 2: Relación entre volumen y superficie de rozamiento de las gotas.

Valores adimensionales

DVM (μ)	Vol. de la gota	Sup. de la gota	Relación vol/sup
300	7.952	283	28
250	4.602	196	23
200	2.356	126	19
150	994	71	14
100	295	31	9
50	0,04	0,08	0,47

Flotabilidad es la capacidad de un cuerpo de sostenerse dentro de un fluido; depende de la densidad relativa de la gota respecto al aire que la rodea.

La gota más pequeña posee más proporción de superficie de rozamiento respecto al peso o al volumen que la gota grande, por lo que flota más (fricción).

A mayor superficie mayor rozamiento y mayor evaporación.

Según Porton (en Mathews 1987; Mathews, G. A.

y Hislop, E.C. 1993) **las gotas de menos de 80 μ de diámetro flotan siempre.**

La dirección del viento es muy importante. Por ej.: la presencia de un cultivo sensible o fuentes de agua cerca del lugar de aplicación, principalmente hacia donde sopla el viento, o la proximidad de centros poblados deben ser evaluadas antes de efectuar la aplicación y durante la misma.

III. Temperatura del aire.

III.1. Variación de la temperatura a lo largo del día.

La temperatura superficial se determina con termómetros de mercurio ubicados a 1,5-2 m de altura en abrigo meteorológico y se observa que existe una oscilación diaria de la temperatura del aire con un mínimo a la hora de la salida del sol y un máximo alrededor de las 15-16 horas.

Estos horarios pueden modificarse por época del año o condiciones de tiempo local; por ej., presencia de nubes, tipo de masas de aire circulantes, humedad del aire, etc. Así es que los días soleados tienen más posibilidad de alcanzar mayor temperatura máxima; si la nubosidad es diurna, habrá menos temperatura máxima pero si es nocturna reduce el enfriamiento de la superficie y afecta a la temperatura mínima.

III.2. Variación de la temperatura con la altura

Es importante recordar que la densidad de un gas es la relación entre la masa y el volumen que ocupa. El aire es básicamente una mezcla de gases con sólidos y líquidos en suspensión. Cuando incrementa su

temperatura se expande y su densidad disminuye (la misma masa de aire ocupa mayor espacio).

El aire caliente tiene menor densidad, o sea, es más liviano que el aire frío; por tanto, cuando una porción de aire sobre una superficie caliente, incrementa su temperatura, se expande, y se mueve fundamentalmente hacia arriba; se vuelve más "liviana" que el entorno y asciende (flotabilidad). En cambio, si el aire se enfría, aumenta su densidad y tiende a descender u ocupar porciones bajas del terreno.

La capa de aire en contacto con el suelo responde rápidamente al intercambio de energía con él. Por lo tanto, su temperatura depende principalmente del calor irradiado por la superficie terrestre. A su vez se presentan otros procesos de transferencia de calor entre la superficie terrestre y el aire, como la conducción (por contacto), la convección (movimiento vertical) y el calor latente (cambio de estado).

En consecuencia, el **calentamiento del aire es de abajo hacia arriba**. Esto determina una disminución de la temperatura con la altura, atribuible al alejamiento de la fuente de calor del suelo, a la menor densidad del vapor de agua con la altura que le resta capacidad para acumular calor, y al enfriamiento por expansión que sufre el aire al elevarse.

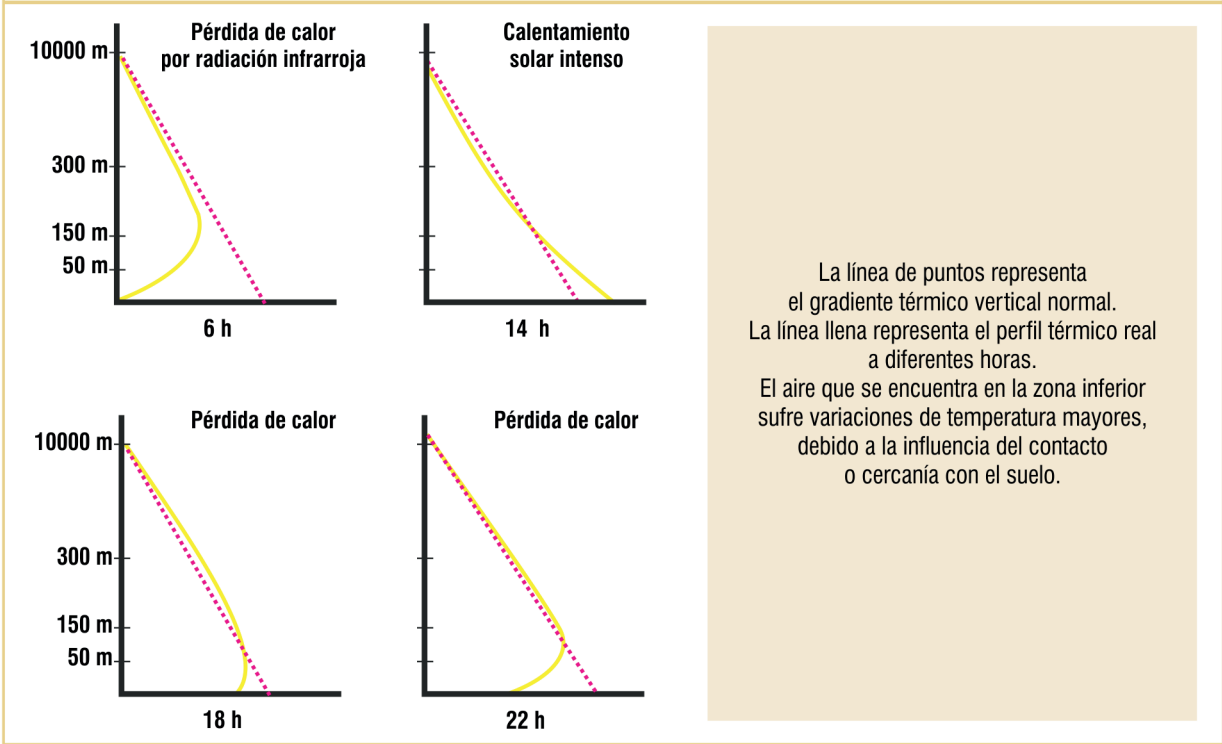
Lo normal es que la temperatura del aire disminuya con el incremento de la altura en, aproximadamente, 1°C/100 m.

Durante el día, la temperatura del aire disminuye con la altura ya que la radiación solar calienta la superficie terrestre, la cual irradia energía, y luego se produce un transporte de calor (molecular y tur-



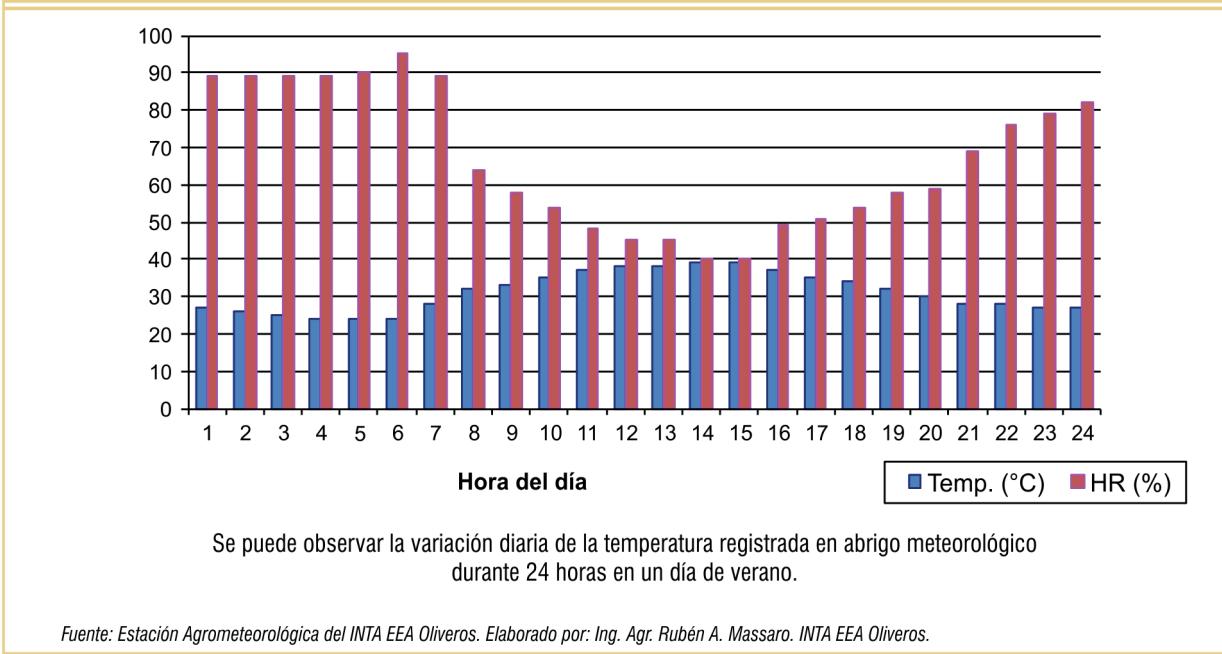
F1

Figura 1: Representación esquemática de la variación de la temperatura en distintos horarios del día y alturas para un día soleado. (Adaptado de Cuadrat y Pita, 2000).



F2

Figura 2: Temperatura y humedad relativa en Oliveros (Santa Fe), el 30-01-2004.





bulento) hacia las capas de aire que se encuentran por encima. En estos horarios, el gradiente térmico es negativo y se lo designa como **perfil térmico normal**. En la Figura 3 puede verse el horario de las 14 horas.

Durante la noche, el suelo continúa disipando calor sin el aporte de la radiación solar, y por lo tanto se irá enfriando progresivamente. Es por ello que durante las últimas horas nocturnas y hasta la madrugada, se puede producir una **inversión térmica** en el perfil del aire; la superficie sufre un enfriamiento por emisión de radiación y enfría al aire en contacto con la misma, siendo la temperatura de las capas más bajas menor que a mayor altura. Se habla de **perfil de inversión térmica** (Thostenson, A.; Enz, J.W. Hofman, V., 2017). En la Figura 1, hay ejemplos de inversión térmica superficial, representados en diferentes horarios, principalmente a las 22 y 6 horas.

III.2.1. Corrientes Convectivas o Térmicas

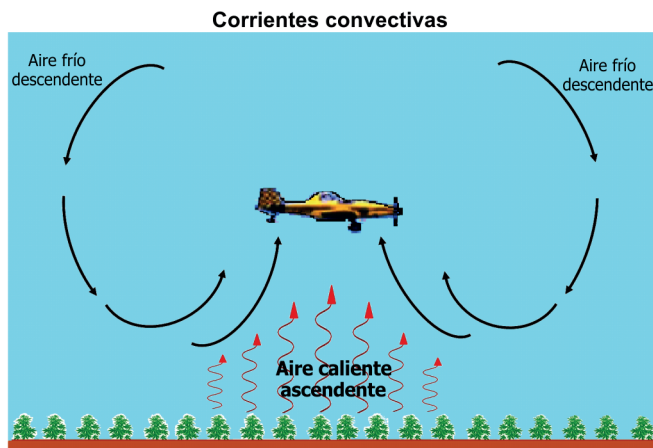
Las corrientes de convección son patrones circulatorios que se presentan en fluidos que se calientan en su base (Figura 3). Al calentarse la parte inferior

del fluido, éste se dilata, disminuye su densidad y produce una fuerza de flotación que hace que el fluido caliente ascienda. Las **corrientes convectivas** pueden arrastrar gran parte de las gotas pulverizadas y este efecto está en función del gradiente térmico (que determina la velocidad del aire ascendente) y del peso de las gotas (dado por su volumen o diámetro). A mayor gradiente térmico mayor es la velocidad del aire y mayor es la posibilidad de este de empujar en forma ascendente a gotas más grandes.

Para que se produzcan térmicas importantes es necesario que actúen varios factores simultáneamente. Primero es necesario que el suelo se haya calentado por la irradiación solar; segundo, que el aire por encima de éste, esté más frío y calentándose por acción de la irradiación del suelo; tercero que haya ausencia de viento o su velocidad sea menor a 3 km/h, dado que vientos mayores mezclan el aire en el perfil y uniformizan la temperatura. Como muestra la Figura 4, cuanto menor cobertura tenga el suelo se calentará más y se enfriará también más, proceso que se realizará con mayor rapidez que un suelo cubierto. Además es importante destacar que para un mismo gradiente térmico, la velocidad del aire será mayor cuando la temperatura es más baja. Es decir,

F3

Figura 3. Corrientes convectivas e influencia sobre las gotas pulverizadas.



Efecto de las corrientes convectivas sobre las gotas pulverizadas

- Temperatura inferior: 30.0 °C
- Temperatura superior: 27.0 °C
- Gradiente térmico: -3.0 °C/m

Diámetro de la gota (μ)	50	100	150	200	250	300	350	400
Movilidad de la gota	A*	A*	A*	A*	D*	D*	D*	D*
Velocidad (km/h)	-3,53	-2,61	-1,78	-1,03	0,29	0,98	1,67	2,64

El aire caliente ascendente puede sacar del cultivo tanto las gotas pequeñas como los vapores generados en el momento de la aplicación e inclusive hasta en días posteriores. Graeme Tepper (2017) sostiene que, según el gradiente térmico, es común que se generen corrientes de 2,5 km/h, lo que puede suspender o elevar gotas de 200 μ de diámetro consideradas "no derivables".

Se conoce que diferencias de temperatura de -3°C o más, son suficientes para generar corrientes convectivas, que si bien no son perceptibles, son suficientes para elevar gotas pequeñas como muestra el ejemplo presente en la figura.



Figura 4. Relación entre la ganancia y pérdida de calor de la superficie del suelo según cobertura.

A mayor área de suelo expuesta, más rápida e intensa es el enfriamiento o calentamiento local



Adaptado de Deveau, J. (2015)

La temperatura del aire junto al suelo se encuentra influenciada por las características del suelo y de su vegetación. Normalmente este tipo de inversiones desaparece en horas de la mañana por acción de la radiación solar incidente. Cuanto más desnudo esté el suelo, se calentará a mayor temperatura y con mayor rapidez que un suelo con presencia de cobertura vegetal, sea esta de rastrojo o de cultivos establecidos con diferentes coberturas del canopeo. La superficie del suelo también afecta la velocidad y dirección del viento, por rozamiento.

es más peligroso un gradiente térmico de, por ejemplo -3 °C/m en invierno que en verano.

Si se aplican plaguicidas en días con corrientes convectivas capaces de elevar las gotas y al mismo tiempo hay capas de inversión térmica en altura, es muy probable que las gotas y vapores arrastrados se acumulen y concentren en la zona inmediatamente inferior a la capa de inversión, pudiendo desplazarse horizontalmente o caer cuando las condiciones meteorológicas cambien.

Si se realiza la pulverización dentro o por encima de la capa de inversión, sea ésta a nivel del suelo (aplicación aérea y terrestre) o en altura (aplicación aérea), las gotas pequeñas no podrán atravesarla y quedaran atrapadas en la misma, no llegando al cultivo.

Es importante pulverizar sin que haya inversión térmica o por debajo de la misma cuando no se den condiciones de corrientes convectivas, en todos los casos las gotas grandes son las apropiadas.

III.2.2. Gradientes térmicos verticales. Estabilidad atmosférica.

El gradiente de temperatura o gradiente térmico es la variación de temperatura en una determinada distancia, ya sea vertical u horizontal, medido en °C/m. Da idea de la tasa de variación de la temperatura por unidad de distancia o altura.

$$GT = (\Delta T) / \text{dist}$$

GT: gradiente vertical es aquél que se relaciona con la estabilidad atmosférica. - ΔT : diferencia de temperatura entre dos puntos. - dist: distancia entre los dos puntos.

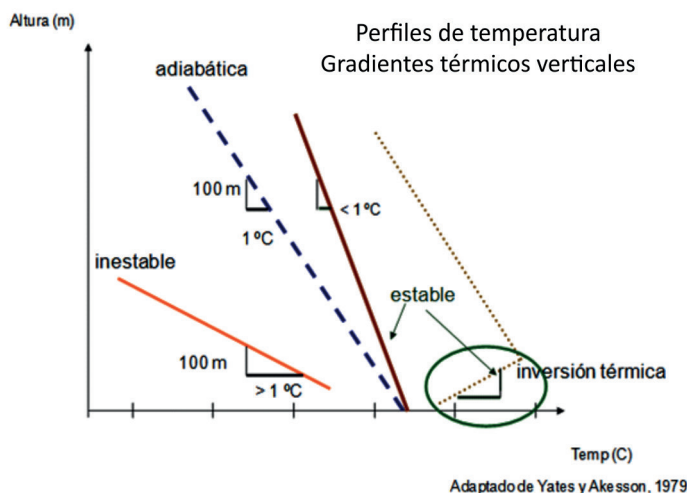
Los gradientes térmicos verticales influyen fuertemente sobre la estabilidad de las mismas capas de aire. A su vez, el contenido de humedad del aire afecta dicho proceso. El gradiente térmico vertical, calculado a partir de mediciones de temperatura a 2 alturas diferentes, da idea del grado de mezcla vertical que puede ocurrir en un momento dado.

En la atmósfera hay pequeños volúmenes de aire cuyos ascensos y descensos son muy rápidos, por lo tanto sus cambios de temperatura (en la vertical) son independientes de la temperatura de la atmósfera a través de la cual se desplazan. Así, cuando ocurre un ascenso, por ejemplo, el aire tiene menor presión, por tanto puede expandirse y se enfría a una tasa aproximada de 1 °C por cada 100 m en aire seco, lo cual es conocido como **tasa adiabática** de descenso de la temperatura con la altitud. (Línea punteada --- en la Figura 5). **Esta tasa permite una convección o mezcla vertical muy suave, y se la define como atmósfera neutra.**



F5

Figura 5: Modelos de perfiles térmicos verticales. Situaciones atmosféricas asociadas.



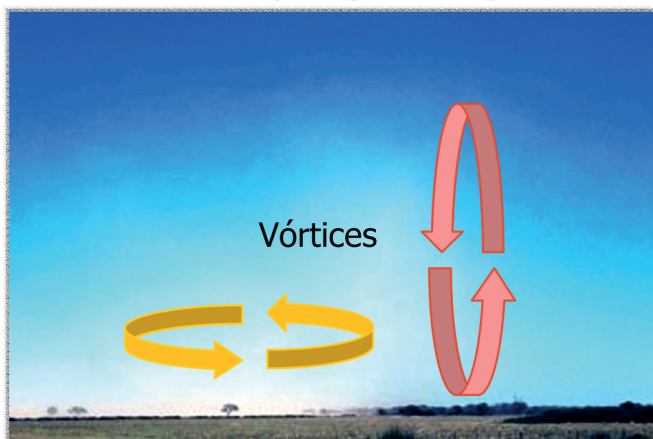
- A mayor altura menor temperatura:
- Natural o Adiabática: el gradiente térmico es de $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$
 - Inestable o súper-adiabático: el gradiente térmico es mayor de $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$
 - Estable o sub-adiabático: el gradiente térmico es menor de $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$

Inversión térmica: gradiente térmico inverso, a mayor altura mayor temperatura.

F6

Figura 6. Torbellino generado por diferencias de temperatura.

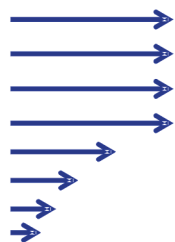
Torbellino en Puna (Santiago del Estero)



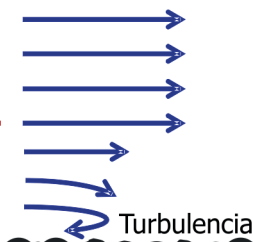
<http://www.unoentrieros.com.ar/un-misterioso-remolino-polvo-inquieta-los-santiaguenos-n912130>

Flujos de aire sobre diferentes superficies

Flujo Laminar



Flujo laminar y Turbulento



El torbellino es un fenómeno meteorológico que consiste en un vórtice de viento (una columna de aire que rota en posición vertical) que presenta movimiento giratorio en torno a un eje.

Los torbellinos se forman cuando en una masa de aire en movimiento surge una diferencia de velocidad entre dos zonas; en el mismo operan corrientes de aire horizontales y verticales por gradiente térmico.

El flujo laminar tiende a concentrar y el turbulento a mezclar y diluir los plaguicidas (Graeme Tepper, 2017).

Según Elliott y Wilson, (1983) los principales factores

que determinan la turbulencia al considerar la pulverización sobre superficies relativamente uniformes de rugosidad moderada son:

- 1- la velocidad media del viento,
- 2- la estabilidad atmosférica y
- 3- los vórtices que se desprenden del pulverizador.

La topografía de un área puede crear microclimas donde temperatura, viento, turbulencia, vórtices y la humedad pueden ser muy diferentes de las áreas adyacentes o generales.

Deberían considerarse las condiciones meteorológicas antes de realizar cualquier aplicación de agroquímicos.



Cuando la **tasa de enfriamiento vertical es mayor al gradiente térmico adiabático** (superficies muy calientes y aire frío en altura), **el ascenso vertical se verá estimulado** (aire caliente y menos denso que su entorno, buscará subir por flotabilidad). Se habla de condiciones de **inestabilidad**. Bajo estas condiciones, el aire que asciende transporta las gotas suspendidas en él y se disipan dentro de las capas superiores por la natural turbulencia y mezcla vertical del aire; no llegan al blanco.

En cambio, **si la tasa de enfriamiento vertical es menor al gradiente térmico adiabático** (poca diferencia de temperatura entre la superficie y el aire en altura), **se dificulta el movimiento vertical**. Se define como **atmósfera estable**.

Un caso particular de estabilidad extrema es la inversión térmica; vale decir, cuando el aire frío está cerca de la superficie, más denso, el ascenso vertical queda inhibido. En estas condiciones, no hay viento o viento a muy poca velocidad, por lo tanto, las partículas o gotas muy pequeñas que estén en suspensión permanecen en el aire flotando. De ocurrir un cambio de condiciones locales, que genere la aparición de una brisa o viento, las gotas podrán ser arrastradas fuera de la zona de tratamiento.

La **determinación de la inversión térmica** debe ser realizada con instrumental específico y no por observación. Una sencilla fórmula (Akesson, Norman y

Yates, 1975; Munn, 1966; citado por Fritz, BK, 2003 y 2008) calcula el índice de Estabilidad Atmosférica (I.E.A.). Para obtener la información necesaria y calcular el I.E.A. se debe disponer de una torre de inversión térmica de 10 m de altura, con dos termómetros ubicados a 2,5 y 10 m de altura y anemómetro a 5 m de altura desde el suelo (Leiva, 2016).

La **inestabilidad del aire** ocurre:

- en días muy soleados o,
- cuando el aire frío sopla sobre superficies cálidas, o
- en las horas del día de mayor insolación.

La **estabilidad del aire** ocurre:

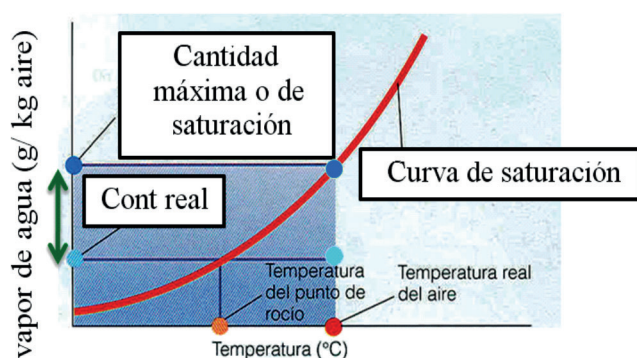
- cuando el gradiente térmico de la atmósfera es muy débil, inferior al gradiente adiabático.
- en las horas nocturnas, cielos descubiertos y/o con vientos muy suaves o sin viento.
- cuando hay inversión térmica (la estabilidad se da dentro de la capa de inversión).

Las **condiciones neutrales** se producen

- durante unos instantes al día, entre las condiciones estables y las inestables.
- en los días con viento o cuando una capa de nubes impide el calentamiento (de día) o enfriamiento (de noche) fuertes de la superficie.

F7

Figura 7: Relación entre la temperatura del aire y el contenido de humedad.



Formas de expresar la humedad del aire: puede ser de distintas maneras pero la más común es la humedad relativa (HR). Es la relación porcentual de vapor de agua presente en el aire respecto de la máxima capacidad que podría contener a la misma temperatura. Se expresa en porcentaje, por lo tanto varía entre 0 y 100%.

Si bien la HR es un término muy común tiene el inconveniente de que varía siempre que cambie la cantidad de vapor de agua presente en el aire y también cuando varía la temperatura y el volumen del aire analizado. Así un descenso de la temperatura del aire, trae una disminución de su capacidad de contener vapor, y por ende un incremento en la humedad relativa, aunque su contenido de vapor real no haya variado.



IV. Humedad relativa del aire

La humedad relativa es la cantidad de vapor de agua presente en el aire; pero éste no puede contener cantidades infinitas de agua sin que ocurra su condensación.

La cantidad de vapor máxima que puede contener el aire depende de la temperatura del mismo; a mayor temperatura, la capacidad aumenta. (Figura 7: línea roja). Para una determinada temperatura existe un máximo contenido de vapor que puede contener (que podríamos llamar “capacidad máxima”); alcanzado este umbral el aire está saturado, y superado comienza la condensación.

IV.1. Variación de la humedad a lo largo del día:

La HR señala una variación diurna de forma simple, dirigida principalmente por la temperatura. El máximo en el verano ocurre al salir el sol, alrededor de las 5 horas y en invierno una hora más tarde. El mínimo se produce después de las 14 hs. (Figura 2).

Temperatura y humedad del aire son de gran importancia para analizar la posibilidad de deriva e interactúan de forma tal que suelen ser los factores determinantes de la evaporación de las gotas de aspersión (Etiennot y Piazza, 2010).

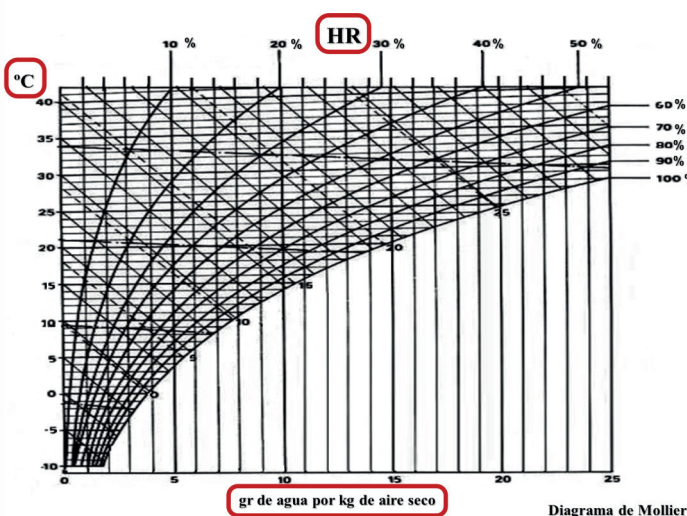
La evaporatividad o potencialidad de evaporación del aire depende del contenido actual de vapor, de su temperatura (ya que condiciona su capacidad de contener vapor) y del viento (tanto en velocidad como contenido de humedad). Debe tenerse en cuenta, además, que el aire húmedo es menos denso que el aire seco a igual temperatura y por tanto también es más inestable.

La medición de la humedad atmosférica se realiza mediante un instrumento llamado **psicrómetro** o par psicrométrico, que en forma indirecta nos dice el contenido de vapor presente o real (expresado como presión parcial), la humedad relativa y también informa sobre el punto o **temperatura de rocío** (temperatura a la cual se alcanza la Humedad Relativa de 100%).

El **psicrómetro** está formado por dos termómetros comunes de Hg, uno de los cuales tiene su bulbo recubierto por una fina tela humedecida permanentemente, por eso se lo llama **termómetro húmedo**; al otro se le da el nombre de termómetro seco.

F8

Figura 8: Diagrama de Mollier.



Muestra la relación entre la Temperatura (°C), la Humedad Relativa (%) y la cantidad de agua presente en aire (gr. de agua por kg. de aire seco). A partir del mismo, por ejemplo, se puede calcular cuánta agua puede retener potencialmente el aire hasta su saturación, a una T°C y HR dada; o cómo varía la HR ante cambios de la T°C si se mantiene constante el agua presente en el aire.

El diagrama de Mollier es una herramienta fundamental para caracterizar el ambiente meteorológico antes y durante las pulverizaciones.



En un ambiente saturado de humedad, ambos termómetros marcarán igual temperatura, ya que bajo esas condiciones no se puede producir evaporación de la película de agua que rodea al bulbo del termómetro húmedo. Si por el contrario, está en un ambiente no saturado, la evaporación sobre el bulbo del termómetro húmedo será intensa, tanto más cuanto más seco se encuentre el aire circundante. Este cambio de estado implica un consumo de calor, que lo tomará del mismo termómetro, quien acusará entonces una temperatura más baja que el termómetro seco. Entonces, **la diferencia de temperatura entre ambos termómetros (ΔT) es proporcional a la sequedad del ambiente.**

Por ejemplo, un volumen de aire equivalente a 1 ha de superficie por 2 m de altura, que está con una temperatura de 15 °C y una HR de 30% ($\Delta T=7$), estará en condiciones de absorber, hasta su saturación, 105,2 kg de agua. Si las condiciones del aire son 30 °C y una HR de 30% ($\Delta T=12$), se saturará después de absorber 224 kg de agua. Este ejemplo, aunque teórico, da una idea acabada de la capacidad potencial de evaporar gotas que tiene el aire, comparado con los volúmenes de aplicación que normalmente se utilizan en agricultura extensiva.



Tabla 3. Diferencia de potencial de absorción de agua del aire a 30 °C, según variación de la HR.

T°	HR	gr. agua/kg aire	gr. agua/kg aire (a 100% HR)	Absorción de agua hasta saturación (gr agua/kg aire)
30	20	5,25	26,46	21,21
	30	7,91		18,55
	40	10,59		15,87
	50	13,31		13,15
	60	15,77		10,69
	70	18,78		7,68
	80	21,11		5,35
	90	23,77		2,69

Ej.: con 20% de HR, posee 5,25 gr de agua/kg de aire seco; para llegar a 100% de HR (saturación) requiere incorporar 21,21 gr de agua más y completar los 26,46 gr de agua/kg de aire seco requerido.

Pero si la HR es de 70%, solo absorberá 7,68 gr., es decir tres veces menos.



Tabla 4. Diferencia de potencial de absorción de agua del aire a 50% de HR según variación de la T°C.

T°	HR	gr agua/kg aire	gr agua/kg aire (a 100% HR)	Absorción de agua hasta saturación (gr agua/kg aire)
5	50	2,68	5,36	2,68
10		3,78	7,62	3,84
15		5,27	10,64	5,37
20		7,25	14,68	7,43
25		9,88	19,67	9,79
30		13,31	26,46	13,15
35		17,75	36,54	18,79
40		23,49	48,84	25,35

El aire se satura con más cantidad de agua al aumentar su temperatura, por lo que la capacidad de absorción de agua del mismo varía considerablemente a pesar de mantenerse constante su % de HR.

Ej.: el aire a 20°C y 50% de HR puede absorber 7,43 gr de agua/kg de aire seco, pero a 35°C puede absorber hasta 18,79 gr.



IV.2. Diferencial térmico (ΔT)

El dato de ΔT es útil porque da idea del poder evaporativo de la atmósfera, y se puede usar para calcular la vida media de la gota pulverizada (Carrancio y Massaro, 2018).

En la Figura 9 se pueden observar puntos de intercepción de temperatura y humedad relativa que unen líneas de igual ΔT . El gráfico permite identificar tres sectores: uno en el cual las condiciones de HR y $T^{\circ}C$ son las mejores para pulverizar (Banda verde); una donde las condiciones indican la suspensión de las pulverizaciones (Banda roja) y dos sectores, por encima y debajo de las condiciones propicias, que indican situaciones marginales o de transición (Bandas anaranjadas).

- Con ΔT por encima de 10, la recomendación es evitar las pulverizaciones.
- Con ΔT por debajo de 2, dada la baja volatilización del agua de las gotas, puede ocurrir un aumento significativo de la vida media y de la posibilidad de migración de las mismas por aumento de la deriva en estado líquido, lo cual estará supeditado al DVM, la intensidad del viento y de las corrientes convectivas.
- Con ΔT cercanos a 0, existe gran probabilidad de rocío.
- Condiciones de ΔT superiores a 8 pueden generar altos niveles de stress tanto en malezas como cultivos.

La utilización del ΔT como indicador de ambiente meteorológico, nos permite determinar ventanas de aplicación, donde la probabilidad de deriva por evaporación sea mínima.

Los gráficos de la Figura 10 muestran las curvas de variación del ΔT para dos días, en la localidad de Zavalla, provincia de Santa Fe.

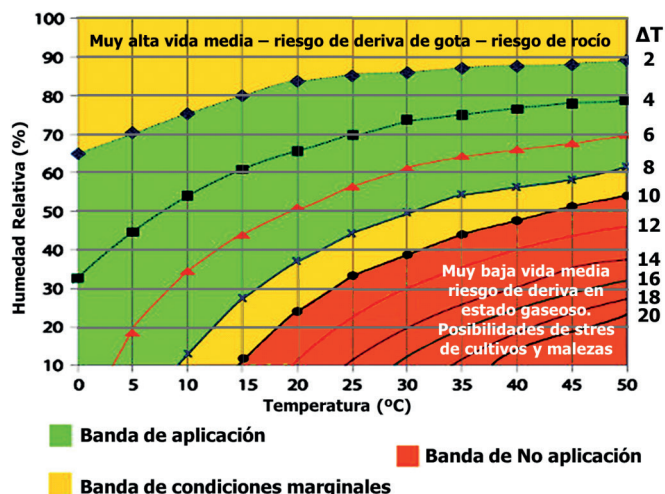
El 31/12/2006 (verano) muestra la imposibilidad de pulverizar entre las 13 y 17 hs, debido a que el ΔT es superior a 8, y entre las 20 y 24 hs y 0 y 8 hs por ser inferior a 2, mostrando dos ventanas de aplicación con bajo riesgo de 8 a 12 hs y 18 a 20 hs.

El 29/04/2006 (otoño) define dos momentos concretos, de 0 a 15 hs riesgo por ΔT inferior a 2 y presencia de rocío y de 16 a 24 hs. con ΔT superior a 2 e inferior a 8, con posibilidad de pulverización con ambiente propicio.

Este tipo de gráfico, también resulta útil para explicar posibles comportamientos de las gotas ante situaciones de daños a terceros causados por las aplicaciones, e inclusive fallas en la eficacia de los tratamientos.

F9

Figura 9: Gráfico de T.



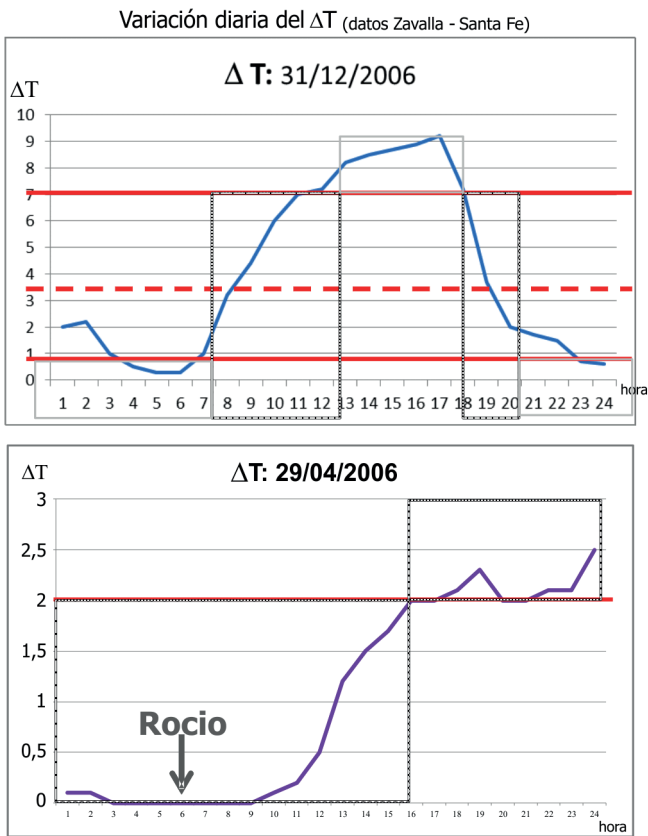
En base al gráfico de ΔT se puede definir la conveniencia o no de realizar una pulverización; en tal sentido se debe tener en cuenta que:

- Con ΔT por encima de 8 existe gran posibilidad de evaporación de las gotas y deriva de plaguicidas en estado de vapor o cristalizados por sobresaturación, al haberse volatilizado el agua.
- Con ΔT entre 8 y 10 se está en una zona de transición o marginal de alto riesgo de evaporación el cual, en algunos casos, puede superarse con gotas grandes ($> 300 \mu$).



F10

Figura 10: Ventanas de aplicación o no aplicación, en diferentes días del año.



Para Graeme Tepper (2017), la rapidez con que se evapora una gota depende del componente acuoso de las gotitas y de la presión de vapor del plaguicida contenido.

La evaporación parcial de las gotitas antes de alcanzar el objetivo, conduce a un tamaño cada vez menor de la misma, gotas más concentradas, tasas de caída más lentas y alto potencial por deriva.

Los residuos iniciales de evaporación son formas altamente concentradas del principio activo. La evaporación total del componente acuoso de las gotitas, cuando contiene un principio activo de alta presión de vapor, ambos pasan a fase gaseosa.

Si luego de la evaporación del agua quedan partículas sólidas (por ej. en el caso de cristalización del principio activo o de un sólido finamente molido que no sublima), por su tamaño y peso flotan en el aire.

T5

Tabla 5: Vida Media en segundos de la gota según Diámetro Volumétrico Medio (DVM) en dos ambientes de humedad y temperatura diferentes, uno con $\Delta T=8$ y el otro con $\Delta T=1,5$.

Vida media de la gota según DVM en un ambiente de $\Delta T = 8$

Tamaño de gota (μm)	Temperatura ($^{\circ}C$)	Humedad Relativa (%)	Vida Media (en segundos)
50	30	45	3,9
100			15,6
150			35,1
200			62,5
300			140,6

Vida media de la gota según DVM en un ambiente de $\Delta T = 1,5$

Tamaño de gota (μm)	Temperatura ($^{\circ}C$)	Humedad Relativa (%)	Vida Media (en segundos)
50	25	87	20,8
100			83,3
150			187,5
200			333,3
300			750,0

Según Johnstone and Johnstone (1977) citado en Matthews, G.A. (1988), recomiendan suspender las aplicaciones de plaguicidas por riesgo de evaporación de las gotas:

- Para volúmenes menores a 50 lt/ha, cuando la Vida Media de la gota es menor o igual a 62 seg.
- Para volúmenes superiores a 50 lt/ha., cuando la Vida Media de la gota es menor o igual a 30 seg.

En los cuadros se puede ver cómo las condiciones meteorológicas influyen en la vida media de la gota.

Es importante aclarar que gotas menores a 250 μ , en ambientes con ΔT apropiado, pueden ser susceptibles de deriva por viento.



Bibliografía citada

- AKESSON, NORMAN Y YATES, 1975. "El empleo de aeronaves en la Agricultura". Fao Roma, Cuadernos de Fomento Agropecuario N° 94. Capítulo 9, Páginas 113-120.
- CARRANCIO, L.A. 2016. Influencia de la velocidad del viento y del tamaño de las gotas en la distancia recorrida. INTA EEA Oliveros. No publicado.
- CARRANCIO, L.A. Y MASSARO, R.A. 2018. "El Delta T (ΔT) como indicador del ambiente meteorológico para pulverizaciones". INTA EEA Oliveros, 5 pág. <https://inta.gob.ar/documentos/el-delta-t-%E2%88%86t-como-indicador-del-ambiente-meteorologico-para-pulverizaciones>.
- CUADRAT, J. M. y PITA, M. F.-2000- Climatología. 1ª edición. Madrid.
- DEVEAU, J. 2015. "Temperature Inversions and Pesticide Drift". Application Technology Specialist OMAFRA, Simcoe. http://sprayers101.com/wp-content/uploads/2015/06/2015_Thermal_Inversions_v2.pdf
- ELLIOTT, J. y WILSON, B. 1983. "The influence of weather on the efficiency and safety of pesticide application; the drift of herbicides" Report of a Working Party of the Research and Development Committee, The British Crop Protection Council (BCPA).
- ETIENNOT, A. y PIAZZA, A. 2010. "Buenas prácticas de aplicación en cultivos planos extensivos". Acta Toxicological (2010) 18:2: 40-53.
- GRAEME TEPPER. 2017. "Weather essentials for pesticide application". Micro Meteorology Research and Educational Services.
- LEIVA, P.D. 2016. Inversión Térmica, meso meteorología aplicada a la reducción de deriva en pulverizaciones aéreas. INTA EEA Pergamino, 7 pág. http://www.agrotec.etc.br/downloads/Inversion%20Termica_Pedro%20Daniel%20Leiva_INTA.pdf
- MASSARO, R.A. 2004. "Tecnología para la aplicación de fungicidas foliares en soja con equipos terrestres. INTA EEA Oliveros, Revista Para Mejorar la Producción 27, Soja campaña 2003/04. 5 pág.
- MASSARO, R.A. 2013. "Aplicación terrestre de plaguicidas: ¡hay que cambiar la forma de trabajar! Los barbechos químicos ofrecen una gran oportunidad". INTA EEA Oliveros. Para Mejorar la Producción 49, Cultivos Invernales, pág. 67-70.
- MATTHEWS G.A. 1988. Métodos para la aplicación de pesticidas. CAB International. UK.
- MATHEWS, G. A. y HISLOP, E.C. 1993. Application Technology for Crop Protection. CAB International. UK.
- THOSTENSON, A.; ENZ, J.W.; HOFMAN, V. 2017. "Variaciones de la temperatura del aire. Causas, características y efectos potenciales en la deriva de pulverización de plaguicidas." Programa de extensión de plaguicidas, 22 pág.

Otra Bibliografía consultada.

- CID, R. FERNANDEZ, D Y MASIA G. 2010-. Tecnología de aplicación de agroquímicos.- INTA, 1ª Ed. Consulta on line.
- MONTEITH, J. L. y UNSWORTH, M. H. 1990. Principles of environmental physics. 2nd edition. Edward Arnold. London.
- SEOANEZ CALVO, M. 2002. Tratado de Climatología Aplicada a la Ingeniería Medioambiental. Colección Ingeniería del Medio Ambiente. Ed. Mundi-Prensa.
- THOM, A. S. 1975. "Momentum, mass and heat exchange of plant communities" in Vegetation and the Atmosphere, Vol. 1, edited by J. M. Monteith. Academic Press Inc., New York.
- VILLALBA y HETZ. 2010. Deriva de productos agroquímicos. Efectos de las condiciones ambientales, cap. 3. En: Tecnología de aplicación de agroquímicos, CYTED, INTA.