

Tamaño de la gota de aspersión, potencial de deriva y riesgo para los organismos no blanco del glifosato aplicado por vía aérea, para el control de la coca en Colombia

Andrew J Hewitt¹, Keith R Solomon², E J P Marshall³

¹ University of Queensland, Centre for Pesticide Application and Safety, Gatton Queensland, Australia, Lincoln Ventures/ Lincoln University, Lincoln, Christchurch, New Zealand, ² Centre for Toxicology and Department of Environmental Biology, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada, y ³ Marshall Agroecology Limited, Barton, Winscombe, Somerset, United Kingdom

Se llevó a cabo un estudio de atomización en túnel de viento para medir el espectro de los tamaños de la gota emitida por las aspersiones de agua y Glyphos® (una formulación de glifosato vendida en Colombia) + Cosmo-Flux® para aplicación aérea para el control de cultivos de coca y amapola en Colombia. El espectro de tamaños de gota fue medido en un túnel de viento para una boquilla Accu-Flo (con 16 orificios de 0,085 (2,16mm)), bajo velocidades de aeronave simuladas adecuadas (hasta 333 km/h), utilizando un instrumento láser de difracción que cubría un rango dinámico de tamaños para las gotas de 0,5 a 3.500 µm. La deriva potencial de la aspersión de glifosato se modeló utilizando el modelo de aplicación y deriva de la aspersión de AGDISP, utilizando parámetros de entrada representativos de los que ocurrían en Colombia en operaciones típicas de aplicación aérea. El espectro de tamaños de gota para las mezclas de tanque de glifosato y Cosmo-Flux fue considerablemente más fino que el del agua y se volvió más fino aún con las mayores velocidades de aeronave. La mezcla del tanque con 44% de glifosato tuvo una Dv_{0,5} de 128 µm, mientras que el valor con la dosis de glifosato de 4,9% fue de 140 µm. Las anteriores se clasificaron como aspersiones Muy finas a Finas. A pesar de ser aspersiones relativamente finas, el modelaje mostró que las gotas no se evaporarían tan rápidamente como la mayoría de aspersiones agrícolas de tamaño similar, debido a que la proporción no volátil de la mezcla del tanque (ingrediente activo y adyuvante inerte) era muy alta. De este modo, la deriva de rango más amplio es muy baja y la mayoría de la que se presenta se va a depositar

relativamente cerca del área de aplicación. La deriva sólo ocurrirá en la dirección del viento y con velocidades de viento menores que las del máximo modelado de 9 km/h, la distancia de deriva se reduciría sustancialmente. El potencial de deriva de la aspersión se podría reducir adicionalmente a través de diferentes prácticas como la selección de las boquillas, los adyuvantes de la mezcla del tanque, las velocidades de la aeronave y las presiones de aspersión que produzcan aspersiones más gruesas. Se construyeron las distribuciones de especies sensibles al glifosato para plantas y anfibios. Con base en la deriva modelada y en concentraciones del 5° centil, las zonas de amortiguación no asperjadas (distancia desde el extremo del brazo de aspersión según el registro electrónico ± 5%) adecuadas para la protección de plantas sensibles estuvieron a 50m hasta 120 m de distancia para los escenarios de aspersión de coca y a considerablemente menos distancia para los escenarios de aspersión de amapola. La zona de amortiguación equivalente para los anfibios fue de 5m. La baja toxicidad del glifosato para los humanos sugiere que estas aplicaciones aéreas no constituyen un problema para la salud humana.

© Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, 2009. Este trabajo fue preparado como parte del Estudio titulado “La Producción de Drogas Ilícitas, el Medioambiente y la Salud Humana,” financiado con contribuciones de los Gobiernos de Colombia y de los Estados Unidos de América. Las conclusiones y opiniones expresadas en el mismo pertenecen a los autores y no necesariamente representan las de la Organización de los Estados Americanos o su Secretaría General, la cual, a la fecha de adquisición de los derechos de autor, no ha formulado ninguna opinión respecto de aquellas.

Dirección de correspondencia: Dr. Andrew J Hewitt, Director, Centre for Pesticide Application and Safety, University of Queensland, Gatton QLD 4343, Australia. E-mail: ahewitt@uq.edu.au

Las aplicaciones aéreas de glifosato para el control de los cultivos ilícitos de coca y amapola se han estado efectuando en Colombia desde 1997. El área de coca asperjada con glifosato ha mostrado un incremento continuo en los últimos años, alcanzando ≈153.000 ha en 2007 (Comunicación Personal; Policía Nacional de Colombia, Bogotá, diciembre, 2007). Ha surgido preocupación en lo referente a los posibles efectos del programa de aspersión aérea sobre el medio ambiente y la salud humana. El 31 de marzo de 2008, el Gobierno de Ecuador presentó una demanda ante la Corte Internacional de Justicia de la Haya, Holanda, contra el Gobierno de Colombia (International Court of Justice 2008). En ella alega que “*la aspersión ya ha causado serios daños a las personas, los cultivos, los animales y el medio ambiente en el lado ecuatoriano de la frontera y representa un grave riesgo de daños adicionales con el transcurso del tiempo*”

La aplicación aérea de herbicidas involucra la liberación de un líquido de aspersión sobre un área blanco, utilizando el equipo adecuado (aeronaves, boquillas, especificaciones del brazo, etc.) y dirigiendo la aspersión hacia el blanco teniendo en consideración los vientos cruzados, los vientos verticales u otros efectos meteorológicos. Muchos estudios han examinado los efectos de la aplicación y los parámetros meteorológicos, químicos y del dosel que pueden influir en el depósito de la aspersión y de este modo en la eficacia y potencial deriva de la aspersión fuera del blanco. Los estudios llevados a cabo por la Spray Drift Task Force (Hewitt et al., 2002) y otros estudios han llevado al desarrollo y validación de modelos exactos como el AGDISP (Bilanin et al., 1989) y AgDRIFT (Hewitt et al., 2001) para predecir el depósito de las aspersiones aplicadas por vía aérea en y fuera del blanco. Este modelo, originalmente desarrollado por el U.S. Forest Service, NASA, U.S. Army y otras organizaciones alrededor del mundo, ha sido ampliamente validado para el uso en evaluaciones de exposición a la deriva de la aspersión para la aplicación aérea de herbicidas como el glifosato. La US Environmental Protection Agency ha sido un participante clave en el desarrollo de estas importantes herramientas de modelaje (Bird et al., 2002) y rutinariamente las utiliza para evaluaciones de riesgo que involucren deriva de plaguicidas. Uno de los factores que afectan de manera más importante el modelaje de la aplicación y del destino ambiental de las aspersiones, es el espectro de tamaños de gota aplicados por la aeronave o el aspersor (Hewitt 1997).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para medir el espectro de tamaños de las gotas emitidas por boquillas Accu-Flo y boquillas de flujo sólido en un túnel de viento, se utilizó un analizador de tamaño de partículas de difracción láser Sympatec HELOS VARIO. Todas las mediciones se hicieron utilizando lentes de 2.000 mm de longitud de foco que medían las gotas en el rango de 0,5 a 3.500 μm . Los datos y resultados se obtuvieron utilizando análisis independiente de modelo (MIA- *method independent analysis*) y software Windox®. MIA es el método habitual de análisis utilizado por otros investigadores de aspersiones de líquidos (e.g., Spray Drift Task Force Hewitt 1994). El túnel de viento, un diseño de corriente longitudinal recta utilizado para dichos estudios (Foster & French 1992), se configuró para liberar corrientes de aire con velocidades hasta de 333 km/h (92,6 m/s; 207 millas/h), que se midieron utilizando sondas de anemómetro de alambre caliente y de Pitot. También se operaron los ventiladores de los extremos para sacar aire a través de la sección de filtro del túnel de viento y asegurar velocidades de aire uniformes mientras se muestreaban

El presente artículo describe un estudio de atomización de túnel de viento para medir el espectro de tamaños de gota en aspersiones de agua sola y del herbicida glifosato (Glyphos®) más el adyuvante Cosmo-Flux®, aplicadas bajo condiciones simuladas de la aplicación aérea para el control de los cultivos de coca y amapola en Colombia. El espectro de tamaños de gota se midió en un túnel de viento para las mismas boquillas Accu-Flo empleadas en la aplicación de aspersiones en el campo, bajo las velocidades simuladas propias de la aeronave (hasta 333 km/h), utilizando un instrumento láser de difracción que abarcaba un rango dinámico de tamaños de gota de 0,5 a 3.500 μm . El tamaño de la boquilla era de 0,085 (2,16 mm) con 16 orificios de descarga. La presión de aspersión fue de 2,4 bar en la boquilla. Utilizando los datos del espectro de tamaños de gota del estudio de túnel de viento, se modeló el potencial de deriva de la aspersión de la mezcla de glifosato utilizando el modelo AGDISP con parámetros de entrada, de aplicación y meteorológicos, representativos de los presentes durante la aplicación aérea característica del control de coca y amapola en Colombia. Con base en las predicciones del modelo y en combinación con los datos de los potenciales efectos ambientales del glifosato y el adyuvante Cosmo-Flux® (Solomon et al., 2007, Brain & Solomon 2008) también evaluamos el riesgo para las plantas y el medio ambiente, asociado con la potencial deriva de la aspersión fuera del blanco, bajo las condiciones de uso en Colombia.

las aspersiones. Todas las mediciones fueron hechas para las gotas atomizadas de la aspersión, i.e. fuera de la distancia de ruptura del ligamento inicial (con el láser a 1,5 m de la boquilla en la dirección del viento). Todas las mediciones se replicaron para proporcionar 2 o 3 medidas por tratamiento, las cuales se promediaron y caracterizaron estadísticamente. La presión de la aspersión se midió utilizando una aguja de presión calibrada conectada a un capilar en la punta de la boquilla y configurada aproximadamente a 2,4 bar (35 psi) para la mayoría de aplicaciones.

En este estudio, las gotas contenidas en la nube de aspersión producida por las boquillas no fueron uniformes espacialmente. El tamaño de la gota variaba a lo largo del vástago de aspersión (por ejemplo, era característico que las gotas más grandes se produjeran en el borde del vástago y las más pequeñas en el centro). Por lo anterior, fue importante asegurar la obtención de una muestra promedio de la sección transversal de aspersión en una localización axial dada, que fuera representativa del vástago de aspersión objeto de

evaluación (Dodge 1988, Snyder et al., 1989). En este estudio se obtuvieron los promedios de las secciones transversales girando verticalmente la boquilla a lo largo del haz del láser mientras se asperjaba.

Además del espectro volumétrico y acumulativo de tamaños de la gota, se calculó el valor $D_{v0,5}$ para el agua como control estándar y para dos mezclas de aspersión diferentes que contenían Glyphos® y Cosmo-Flux®. El $D_{v0,5}$ o diámetro de la mediana de volumen, es el diámetro de la gota (μm) en el cual el 50% del volumen total de la aspersión está contenido en gotas de mayor y menor diámetro. Los valores de los parámetros de tamaño de la gota se calcularon mediante el analizador de tamaño de partículas de acuerdo con el estándar E799-87 ASTM (ASTM 1987). En este estudio, había interés en el volumen de aspersión contenido en gotas relativamente pequeñas, i.e., aquellas con diámetros por debajo de 150 μm . Éstas representan las gotas más finas en la aspersión que en condiciones desfavorables, podrían representar más de un riesgo de exposición a la deriva de la aspersión, en el sentido del viento.

Se realizaron corridas experimentales utilizando a) agua sola, b) agua, 44% de Glyphos®, 1% de Cosmo-Flux® como se utiliza en el tratamiento de cultivos de coca, o c) agua, 4,9 de Glyphos®, 0,5% de Cosmo-Flux® como se utiliza en el tratamiento de cultivos de amapola. El Glyphos® y el Cosmo-Flux® fueron exactamente los mismos productos utilizados en Colombia para aplicación aérea. La dosis de aplicación aérea de glifosato para la coca es 3,69 kg a.e. /ha. Para maximizar la penetración y la efectividad de la formulación de aspersión, el Glyphos® es mezclado en el tanque con un producto adyuvante (CosmoFlux 411F; Cosmoagro, Bogotá). El Cosmo-Flux es un adyuvante agrícola que contiene surfactantes no iónicos (una mezcla de polietoxilatos aril y lineales: 17% w/v) e isoparafinas (83% v/v). Estas mezclas de tanque fueron preparadas mezclando volumétricamente los componentes, utilizando cilindros de medición graduados. Las mezclas se agitaron cuidadosamente y se colocaron en contenedores presurizados de 20 L. Se utilizó aire comprimido para expulsar a través de boquillas los productos de los tanques de aspersión, para muestrear el espectro de tamaños de gota en el túnel de viento. Se hicieron aplicaciones de cada tanque a través de la boquilla Accu-Flo (0,085 (2,16 mm) con 16 orificios, tal como se utiliza en Colombia) y una boquilla alterna de tipo D10 a velocidades de aeronave simuladas de 259, 296 y 333 km/h. La boquilla Accu-Flo también se probó en un prototipo de cámara Venturi reversa para observar si estos dispositivos, empleados para reducir los efectos de la fricción del aire en la atomización del líquido, podrían aumentar el tamaño de la gota.

Modelado de deriva de la aspersión

Las evaluaciones de la deriva y depósito de la aspersión se llevaron a cabo utilizando el modelo AGDISP. Este modelo fue desarrollado y validado por la NASA, U.S. Forest Service, U.S. Army, Spray Drift Task Force y otros, durante varias décadas de silvicultura aérea (Bilanin et al., 1989) y aplicación aérea de aspersiones agrícolas (Hewitt et al., 2002). El modelo AGDISP se corrió utilizando las siguientes entradas:

- Datos del tamaño de las gotas medidas en las pruebas del túnel de viento, especificados en 32 clases de tamaños por volumen de la aspersión
- Para OV-10 y AT-802, 60 boquillas Accu-Flo (máximo permitido por el modelo AGDISP); para Ayres Turbo Thrush (ATT-65), 35 boquillas Accu-Flo, espaciadas regularmente en el brazo, con espacios equivalentes a 74 boquillas a 114 mm para OV-10; 96 boquillas a 140 mm para AT-802 y 35 boquillas a 152 mm para ATT-65.
- Tipos de aeronave tomados de la librería para incluir, Ayres Turbo Thrush 65, Bronco OV-10 y Air Tractor 802 con configuraciones características, patrones de vórtex y especificaciones predeterminadas, a excepción de la velocidad del vuelo operacional.
- Velocidades de vuelo de la aeronave de 333 km/h para OV-10, 274 km/h para AT-802 y 226 km/h para ATT-65
- Composiciones de la mezcla del tanque para representar agua con 4,992 o 1,2 kg/ha de sal isopropilamina de glifosato (según lo apropiado para modelar cada escenario de aplicación), de las cuales se asume que la dosis a.e. fue 75%. Parámetro de dosis 'no volátil' para asumir que todas las moléculas de glifosato y Cosmo-Flux eran no volátiles. Mezcla total del tanque para aspersiones de coca a dosis del volumen de aspersión de 10,4 L/ha (1,11 galón/acre)
- Altura de la aeronave sobre el suelo 30,48m
- Altura del dosel (árboles) 25,91 m
- 1 línea de vuelo (i.e. aplicaciones de corredor de aspersión simple tal como se usan operativamente en Colombia)
- Ancho efectivo del corredor de aspersión 18,3 m
- Velocidad del viento de 2,57 m/s (9,3 km/h) a 90° de la dirección de vuelo de la aeronave (i.e. viento cruzado perpendicular)
- Temperatura del aire de 35°C y humedad relativa de 70%
- Estabilidad atmosférica débil (insolación solar débil equivalente a cubierta de nubes completa o parcial)
- Tasa de evaporación 37 $\mu\text{m}^2/\text{C}/\text{s}$ (representativa de los productos de glifosato)

Los demás valores de entrada del modelo correspondieron a la configuración preestablecida del modelo.

Evaluación del riesgo

Los anfibios, en una evaluación de riesgo previa, fueron identificados como los organismos acuáticos en mayor riesgo por la aspersión directa (Solomon et al., 2007) y las plantas, dado que el glifosato es un herbicida para el control de las mismas, estarían potencialmente en riesgo por la aspersión directa (desenlace esperado), así como por la deriva de la aspersión. Dado que los riesgos para la salud humana resultantes de la aspersión directa de glifosato-Cosmo-Flux® fueron considerados insignificantes en estudios previos (Solomon et al., 2007), cualquier exposición resultante de la deriva también sería insignificante. Se calculó un valor de riesgo determinístico para los anfibios y las plantas, a partir del intercepto del 5° centil de los valores de toxicidad y los valores de depósito de la deriva obtenidos del modelo AGDISP.

Los datos de toxicidad se obtuvieron de las plantas y de la especie acuática más sensible, los anfibios. Los datos de toxicidad para las plantas se obtuvieron de la base de datos USEPA Ecotox (USEPA 2001) para los efectos del glifosato en las plantas. Los valores fueron EC25s de las pruebas de las plantas asperjadas con glifosato formulado (principalmente Roundup®). Estos valores fueron convertidos a g/ha para permitir una base común para comparaciones. Se acepta que el Cosmo-Flux® puede aumentar la potencia de la mezcla para las plantas; sin embargo, no había datos de sensibilidad a la mezcla en plantas diferentes a la coca, en la cual había poca diferencia entre Glyphos® sólo o combinado con Cosmo-Flux® (Marshall et al., 2008). Los datos de las plantas se ajustaron a una distribución normal logarítmica para crear una distribución de sensibilidad de la especie (SSD, Solomon & Takacs 2002). Hecho esto, se utilizaron las plantas de prueba como subrogados para otras plantas en el medio ambiente, un proceso normal para evaluar los riesgos utilizando SSDs. Los datos de toxicidad del glifosato formulado en los anfibios se obtuvieron de la literatura, de acuerdo con un resumen en otra fuente (Brain & Solomon 2008). Estos datos son para glifosato formulado sin adición de Cosmo-Flux®, pero las pruebas de toxicidad en la mezcla de aspersión con la especie de ranas más sensible (*Xenopus laevis*) (Wildlife International 2006) no mostró una sensibilidad aumentada sobre valores publicados previamente (Edginton et al., 2004). El 5° centil de la distribución se calculó utilizando los valores transformados para la pendiente y el intercepto de la línea de regresión de SSD. El 5° centil de SSD de los anfibios se calculó de la misma manera y se convirtió de concentración a dosis por ha, bajo el supuesto de peor

caso de una concentración resultante de la aspersión directa de un estanque de 15 cm de profundidad sin reducción de la exposición mediante adsorción a los sedimentos y materia orgánica y sin intercepción por las plantas vecinas.

RESULTADOS

Espectro de tamaños de gota

Los tamaños de gota de la boquilla Accu-Flo se hicieron más finos a medida que la aeronave aumentaba su velocidad, debido a la mayor fricción del aire en el punto de atomización líquida (Tabla 1). Por ejemplo, para la mezcla del tanque para aspersión de la coca, a medida que la velocidad de la aeronave aumentó de 259 a 296 y a 333 km/h, el valor $D_{v0.5}$ (diámetro de la mediana del volumen del tamaño de la gota) de las aspersiones disminuyó respectivamente de 219 a 173 y a 128 μm y el volumen de la aspersión fina en las gotas de diámetro por debajo de 150 μm , aumentó de 35 a 44 y a 57%.

Las aspersiones de agua fueron mucho más gruesas que las mezclas del tanque que contenían glifosato y Cosmo-Flux®. Algunos ejemplos para las mezclas de tanque de los dos ingredientes activos a velocidad de la aeronave de 333 km/h (180 nudos) se muestran en las Figuras 1 y 2. Hubo menor diferencia en el tamaño de las gotas en las mezclas de tanque de los dos ingredientes activos, siendo ambas considerablemente más finas que las aspersiones de agua. Un ejemplo del efecto de la composición de la mezcla del tanque en el tamaño de las gotas para aplicaciones a través del orificio de mayor tamaño de la boquilla Accu-Flo, a una velocidad de la aeronave de 296 km/h, se presenta a continuación. La aspersión de agua tiene un valor $D_{v0.5}$ de 250 μm y 31% del volumen de aspersión en gotas finas < 150 μm . Las mezclas de tanque que contienen glifosato y Cosmo-Flux fueron mucho más finas con valores $D_{v0.5}$ cercanos a 175 μm y 44% del volumen de aspersión en gotas < 150 μm (Tabla 1). Hubo una clara relación casi lineal ($r^2 \geq 0,996$) entre el tamaño de gota y la velocidad efectiva de la aeronave dentro del rango probado en este estudio para las aspersiones de coca (Figura 3), que permite la extrapolación del tamaño de gota para la boquilla Accu-Flo, a las velocidades de aeronave adicionales.

TABLA 1.

Diámetro de la mediana del volumen del tamaño de gota ($D_{v0.5}$) y volumen de la aspersión fina en gotas por debajo de $150 \mu\text{m}$, para el agua y las mezclas de tanque para el control de coca y amapola, para boquillas Accu-Flo y D10. Los datos son las medias de 3 corridas.

Tipo de boquilla	Accu-Flo (0.085-16)			D10		
Solución de aspersión	Velocidad (km/h)	$D_{v0.5}$ (μm)	% volumen < $150 \mu\text{m}$	$D_{v0.5}$ (μm)	% volumen < $150 \mu\text{m}$	
Agua	259	253	29	329	17	
	296	250	31	-	-	
	333	217	37	225	31	
Aspersión de la coca 44% glifosato + 1% CosmoFlux	259	219	35	229	30	
	296	173	44	179	41	
	333	128	57	147	51	
Aspersión de la amapola 4.9% glifosato + 0.5% CosmoFlux	259	194	39	-	-	
	296	178	43	-	-	
	333	139	53	167	45	

Nota: Los datos son las medias de 3 corridas.

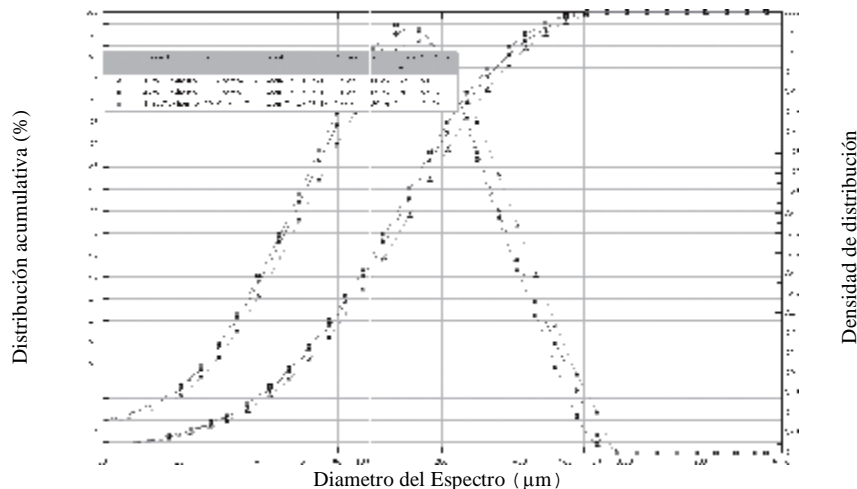


FIG 1. Espectro volumétrico del tamaño de gota en la mezcla de aspersión para el control de la coca a una velocidad de aeronave de 333 km/h (180 nudos) con la boquilla Accu-Flo

El estudio incluyó evaluaciones de sistemas de aplicación alternos a las boquillas Accu-Flo actualmente en uso. Las boquillas Accu-Flo son efectivas para aumentar el tamaño de gota en aplicación de aspersiones con aeronave de rotor (helicóptero), pero con su diámetro de orificio relativamente pequeño son menos efectivas a velocidades de la aeronave muy altas. Las boquillas de chorro sólido de orificio grande como las D10 (llamadas así por su diámetro de orificio de 10/64 pulg (4 mm)) ofrecen una alternativa viable, especialmente si se utilizan a presiones de aspersión

altas para aumentar el alcance de la aspersión. A la misma presión de aspersión (2,4 bar), esta boquilla

aumentó el $D_{v0.5}$ a 333 km/h de 139 a 168 μm , con una disminución proporcional ~15% en las gotas <150 μm respecto a la boquilla Accu-Flo (Tabla 1). El uso de presiones de aspersión más altas probablemente produciría aspersiones aún más gruesas con esta boquilla, de acuerdo con observaciones de investigaciones previas con boquillas de ángulo estrecho y orificio grande (e.g., chorro sólido grande), en aeronaves de alta velocidad.

Las pruebas con un prototipo de cámara Venturi reversa mostraron que se puede lograr aumento en el tamaño de las gotas en la aspersión, especialmente de las “finas” (Figura 4). Por ejemplo, hubo una disminución de 31.3% a 24.7% en las “finas” a una velocidad de la aeronave de 296 km/h.

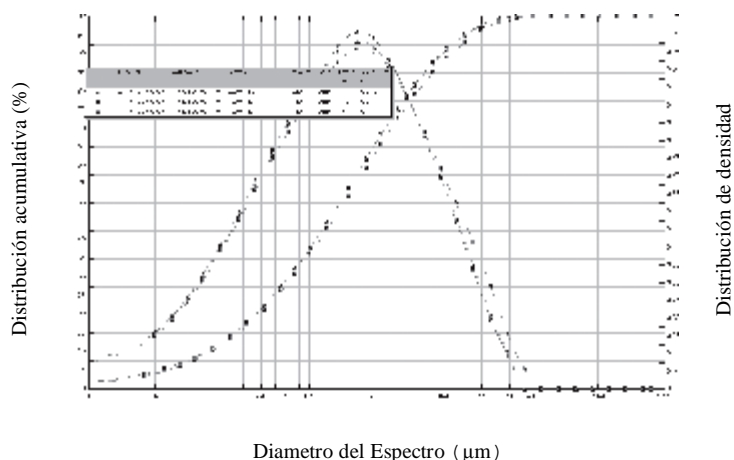


FIG. 2. Espectro volumétrico del tamaño de gota en la mezcla de aspersión para el control de la amapola a una velocidad de aeronave de 333 km/h (180 nudos) con la boquilla Accu-Flo

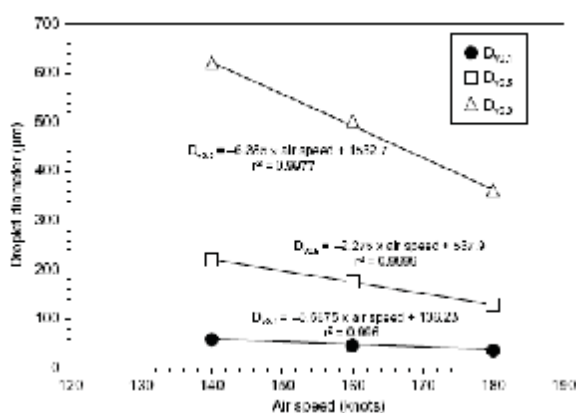


FIG 3. Valores parámetro del tamaño de gota ($D_{v0.1}$, $D_{v0.5}$ and $D_{v0.9}$) a diferentes velocidades de aeronave para la boquilla Accu-Flo con líneas de regresión ajustadas.

Modelaje de deriva

El modelo AGDISP mostró que el potencial de deriva de la aspersión para estas aplicaciones era equivalente al de las aspersiones Finas a Muy Finas. Sin embargo, la alta proporción de la mezcla del tanque de materiales no volátiles (el producto del ingrediente activo y el adyuvante inerte) y la humedad relativamente alta (70%) del aire durante estas aplicaciones reducía las tasas de evaporación de manera significativa en comparación con aplicaciones agrícolas similares. Además, el dosel de árboles y la vegetación adyacente son muy efectivos interceptando la aspersión y reducirán la disponibilidad de gotas para la deriva fuera del blanco donde estos árboles y vegetación están presentes (AgDRIFT 2008).

Las tasas de depósito fuera del corredor de aspersión predichas por el modelo para glifosato (a.e.), utilizando cada uno de los tres tipos de aeronave simulado se presentan en la Figura 5. Las tasas medias de depósito para la mayoría de dosis de aplicación, i.e. la aspersión de coca, en el bloque de aspersión objetivo estuvieron entre 3.030 y 3.260 g/ha, cifra cercana a la tasa objetivo de 3.690 g/ha del producto activo. El potencial de deriva de la aspersión estuvo relacionado con la velocidad de la aeronave y fue similar a la del AT-802 y el OV-10, pero fue menor para el ATT-65 más lento, en el cual la fricción del aire en las boquillas produjo aspersiones más gruesas.

Debido a que la humedad relativa (HR) del aire tiene influencia sobre la deriva de la aspersión, particularmente para las gotas más pequeñas, se llevó a cabo un modelaje adicional para caracterizar la deriva a una HR de 90%, más característica de las condiciones que se presentan en Nariño y Putumayo, en la parte suroccidental de Colombia. Los datos del modelaje (Figura 6) demuestran que la mayoría del ingrediente activo (>90%) se deposita dentro de los 100 m del borde del corredor de aspersión. Bajo condiciones de mayor humedad, se presenta un depósito comparativamente menor del ingrediente activo en distancias en la dirección del viento, siendo el diferencial más pronunciado en distancias más allá de 200 m. Este patrón afecta la influencia no proporcional de la humedad relativa en las gotas más pequeñas (<150 µm) las cuales son primariamente responsables de la deriva, pero también portadoras de una proporción muy pequeña de la cantidad total de ingrediente activo liberado en el aire. El efecto de la evaporación se debe a la pérdida de agua y es importante, porque aún la mezcla de tanque más concentrada incluye aproximadamente 50% de su volumen en agua. Esto

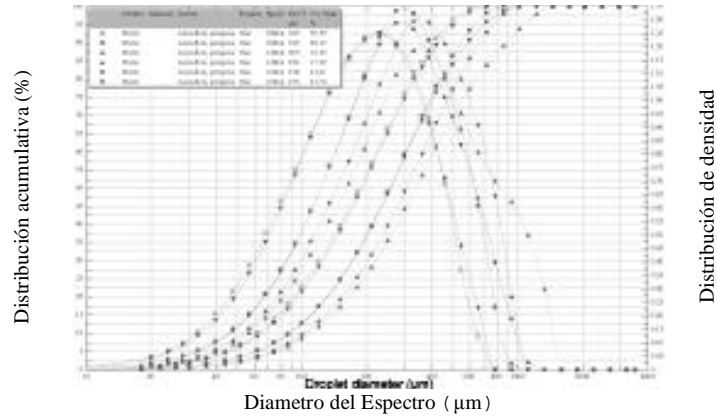


FIG. 4. Distribución del tamaño de gota de las boquillas Accu-Flo en la cámara Venturi inversa. VMD para el agua sola a 259, 296 y 333 km/h (140, 160 y 180 nudos) fue 321, 257 y 187 μm respectivamente.

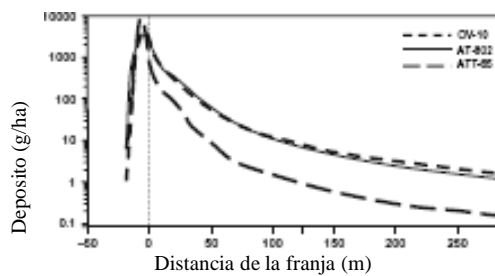


FIG. 5. Depósito predicho con AGDISP (g/ha en escala logarítmica) para diferentes tipos de avión a velocidades de vuelo representativas. Las distancias negativas representan depósito dentro del área blanco. 0 m representa el borde del bloque de aspersión en la dirección del viento.

significa que por lo menos la mitad del volumen de la gota podría potencialmente perderse por la evaporación.

Los volúmenes de aspersión provenientes del aire disminuyeron muy rápido y se predijo que la mayor parte de la aspersión se depositaría aproximadamente 30 segundos después de ser liberada de la aeronave.

Datos de toxicidad

Los datos de toxicidad se obtuvieron de las plantas y de la especie acuática más sensible, los anfibios. Los datos de toxicidad para las plantas se tomaron de la base de datos USEPA ECOTOX (USEPA 2001) para los efectos del glifosato en las plantas. Los valores fueron los EC25s obtenidos de las pruebas para plantas asperjadas con glifosato formulado. Estos valores fueron convertidos a g a.e./ha para permitir una base común de comparación (Tabla 2).

La planta más sensible en el conjunto de datos fue *Brassica rapa* y la menos sensible fue *Magnoliaphyta* spp. Los datos de las plantas se ajustaron a una distribución normal logarítmica para crear una distribución de la sensibilidad de la especie (SSD;

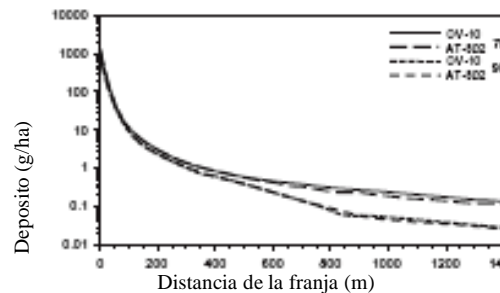


FIGURA 6. Influencia de la humedad relativa en el potencial de deriva de la aspersión de la mezcla glifosato-Cosmo-Flux® tal como se utiliza para asperjar la coca. La HR de 90% es más característica de la región sur occidente de Colombia. Observe que el eje Y es una escala logarítmica para mostrar de mejor manera que el efecto de la HR en la aspersión es más pronunciada a tasas de depósito de menos de 10 g/ha.

Figura 7) utilizando métodos estándar (Solomon & Takacs 2002). Al hacer esto, las plantas de prueba se utilizaron como subrogados para otras plantas en el medio ambiente, un proceso normal para evaluar riesgos utilizando SSDs. El dato de *Magnoliaphyta* spp. se graficó en SSD pero no se empleó en la regresión por considerarse un valor atípico. El 5° centil de la distribución se calculó utilizando los valores transformados para la pendiente y el intercepto de la línea de regresión de SSD (Tabla 3).

Para los anfibios, los datos de toxicidad para el glifosato formulado fueron tomados de la literatura como se resume en un artículo acompañante (Brain & Solomon 2008). Estos datos son para glifosato formulado sin la adición de Cosmo-Flux®, pero las pruebas de toxicidad con la mezcla de aspersión en la especie de ranas más sensible (*Xenopus laevis*) (Wildlife International 2006) no mostraron aumento en la sensibilidad respecto a valores previamente publicados (Edgington et al., 2004). El 5° centil de la SSD del anfibio se calculó según se describió previamente (Tabla 3) y se convirtió de

TABLA 2.
Datos de toxicidad en plantas para el glifosato formulado.

Nombre científico de la especie	Nombre común de la especie Name	EC25 (g/ha)	Efecto	Duración de la exposición (Días)
<i>Brassica rapa - rapa</i>	Nabo	36	Desarrollo	28
<i>Raphanus sativus</i>	Rábano	44	Crecimiento	21
<i>Cucumis sativus</i>	Cohombro	60	Desarrollo	28
<i>Glycine max</i>	Soya	76	Crecimiento	28
<i>Triticum aestivum</i>	Trigo	78	Crecimiento	28
<i>Helianthus annuus</i>	Girasol	78	Desarrollo	21
<i>Sorghum bicolor</i>	Sorgo	78	Crecimiento	21
<i>Beta vulgaris</i>	Remolacha	87	Crecimiento	28
<i>Abelmoschus esculentus</i>	Okra, Quimbombó, Quingombó, Ají turco, Gumbo, Gombo, Algalia, Angelonia, Ocra, Yerba de culebra Hibiscus	90	Crecimiento	28
<i>Raphanus sativus</i>	Rábano	100	Desarrollo	28
<i>Beta vulgaris</i>	Remolacha	103	Desarrollo	21
<i>Triticum aestivum</i>	Trigo	108	Crecimiento	21
<i>Lactuca sativa</i>	Lechuga	111	Crecimiento	28
<i>Zea mays</i>	Maiz	117	Desarrollo	336
<i>Avena sativa</i>	Avena común	120	Desarrollo	28
<i>Allium cepa</i>	Cebolla común	137	Desarrollo	21
<i>Glycine max</i>	Soya	157	Crecimiento	21
<i>Cucumis sativus</i>	Cohombro	220	Desarrollo	21
<i>Cyperus rotundus</i>	juncia real, castañuela, chufa púrpura, corocillo o coquito	372	Crecimiento	28
<i>Pisum sativum</i>	Alverja	436	Desarrollo	21
<i>Magnoliophyta</i>	Angiosperma	1958	Desarrollo	28

Nota: Datos obtenidos de (USEPA 2001).

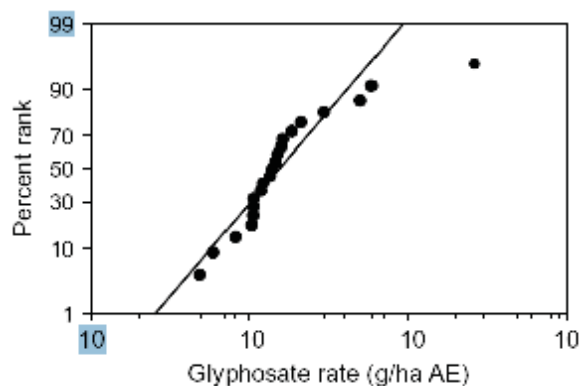


FIG. 7. Distribución de la sensibilidad de la especie (SSD) a glifosato en plantas

concentración a dosis por ha, bajo el supuesto de que la concentración era resultado de la aspersión directa de un estanque de 15 cm de profundidad sin reducción de la exposición por absorción en los sedimentos y la materia orgánica.

Riesgo ambiental

Los valores de riesgo determinístico para los anfibios y las plantas se obtuvieron a partir del intercepto del 5° centil de los valores de toxicidad (ver atrás) y de los valores de depósito de la deriva de la Figura 5. Estos valores se presentan en la Figura 8. Los anteriores datos muestran que, para la aeronave ATT-65, el peor caso de deriva de la aspersión será aquel cuyo valor de toxicidad del 5° centil no sea excedido fuera del área del corredor de aspersión. Esto es indicativo de riesgo insignificante para los anfibios localizados en los estanques de 15 cm ubicados fuera del campo para este tipo de aeronave.

Para el peor caso de deriva de la aspersión para el AT-802 y el OV-10, el modelo predice que el valor de toxicidad del 5° centil para los anfibios puede ser

TABLA 3.

Coefficientes de regresión e interceptos para las distribuciones de los datos de toxicidad para las exposiciones agudas de plantas y ranas al glifosato formulado.

Fuente de datos	$y = ax + b$		Interceptos de centil (a.e.)		
	n	r ²	a	b	5% Units
Plantas	21	0.9	2.96	-6.47	43 g/ha
Anfibios	11	0.9	3.68	-12.53	917 $\mu\text{g/L}$ (= 1368 g/ha en agua de 15 cm de profundidad)

excedido en estanques de 15 cm de profundidad ubicados a menos de 5 m del límite del campo. De este modo los anfibios podrían estar en riesgo en los sitios donde los estanques que contengan larvas de especies sensibles estén en campos de coca o a menos de 5 m del borde del corredor de aspersión. Los estudios en el

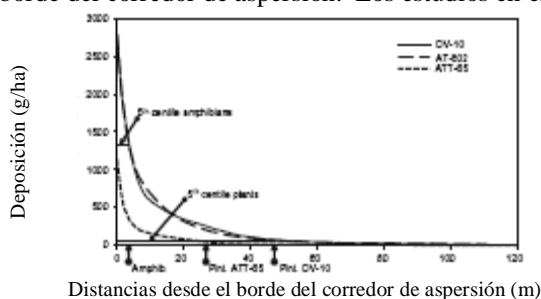


FIG 8. Valores del depósito de deriva modelada para glifosato más Cosmo.Flux® superpuestos con los valores de toxicidad del 5º centil para plantas y anfibios. Las distancias desde el borde del corredor de aspersión donde pueden estar en riesgo las plantas y anfibios sensibles se señalan con las flechas en el eje X.

microcosmos del campo muestran que la toxicidad para las larvas de anfibios se reduce en presencia de sedimentos naturales y que las larvas de los anfibios no estarían en riesgo incluso con una aspersión directa del doble de la dosis normal de aplicación (Thompson et al., 2004, Wojtaszek et al., 2004, Bernal & Solomon 2008).

Para las plantas, que son más sensibles al glifosato, los riesgos del peor caso modelado de la deriva son mayores. Para la deriva de la aspersión del ATT-65, las plantas sensibles localizadas a menos de 30 m del borde del campo pueden afectarse por la deriva de la aspersión. Para la deriva de la aspersión del AT-802 y del OV-10, pueden verse afectadas las plantas sensibles localizadas a menos de 50 m del corredor de aspersión. Los efectos adversos por fuera de la distancia son improbables, especialmente debido a que el glifosato ha mostrado que estimula el crecimiento de algunas especies de plantas como el maíz, la soya el eucalipto (*Eucalyptus grandis*), el pino (*Pinus caribea*) y la oreja de gato (*Commelina benghalensis*) a dosis en el rango de 1,8 a 36 g de glifosato a.e./ha (Velini et al., 2008).

Discusión y Conclusiones

La toma de decisiones efectiva en la aplicación aérea de plaguicidas puede apoyarse en el uso de herramientas adecuadas e información de modelaje y evaluación de riesgo. Este informe describe un estudio para evaluar el riesgo de exposición de la deriva de la aspersión en aplicaciones aéreas de campo de glifosato para control de cultivos de amapola y coca en Colombia. Los espectros de tamaños de gota generados en este estudio cuando se aplicaron las mezclas de tanque a través de boquillas Accu-Flo, bajo velocidades de aeronave simuladas relativas a las aplicaciones de campo, se clasificaron como aspersiones Muy Finas a Finas. Los datos de entrada para el modelo de riesgo de exposición de deriva de la aspersión, AGDISP, para evaluar el potencial de deriva fuera del blanco y el desempeño de la aspersión en el blanco fueron el tamaño de las gotas, la aplicación, la mezcla de herbicida del tanque, las características meteorológicas y del dosel/terreno para las condiciones colombianas. Los resultados predijeron que la mayoría de la aspersión se deposita de manera segura dentro del área objetivo o a unos pocos cientos de metros de la aplicación, en el sentido del viento. Para la aspersión de coca, un área amortiguadora no asperjada apropiada para proteger a las plantas sensibles de la deriva de la aspersión sería de 50 a 120 m. Se propone que sea un amortiguador bidireccional ya que la deriva sólo ocurre en sentido del viento y no en sentido contrario.

La extensa vegetación del dosel del bosque y del medio ambiente alrededor del área en la cual se hace aspersión de las plantas de coca y amapola en Colombia aportarán excelentes reducciones en el potencial de deriva de la aspersión al interceptar las gotas con las hojas y otras superficies (Raupach et al., 2001). Esto reducirá sustancialmente el riesgo de exposición a la deriva de la aspersión respecto a los valores reportados en este estudio de 50-90% (AgDRIFT 2008). El presente estudio ha mostrado que las mezclas del producto del tanque producen hasta 50% más gotas pequeñas, derivables, que el agua sola. Esto se debe en gran medida a la tensión de superficie relativamente poco dinámica y a la viscosidad extensional de la mezcla del tanque cuando se adicionan estos materiales activos e inertes. Se pueden llevar a cabo pruebas para evaluar la efectividad de adyuvantes alternos para aumentar el tamaño de la gota o incluso de productos de glifosato con menor carga de surfactante o con características de atomización o propiedades físicas más favorables. Algunos candidatos de adyuvantes de emulsión / polímeros para posibles pruebas podrían incluir agentes de suspensión invertida, aceite esterificado de semillas, poliácridamida y / o goma guar con sulfato de amonio y adyuvantes que contengan lecitina.

Debido a que la aspersión directa sobre los humanos con glifosato más Cosmo-Flux® fue un riesgo insignificante para la salud humana, (Solomon et al., 2007), la exposición a la deriva en el sentido del viento presenta un riesgo aún menor. Los anfibios en estanques superficiales a menos de 5 m en sentido del viento del borde del campo pueden estar en riesgo en condiciones de peor caso, pero los experimentos del microcosmos del campo han mostrado que este no ocurre así donde hay presencia de sedimentos naturales. La aplicación de glifosato, como herbicida translocado de amplio espectro, puede implicar un riesgo para las especies de plantas más sensibles en áreas a menos de 30-50 m en sentido del viento de los blancos de aspersión. Sin embargo, el depósito de la deriva sólo se presentará en sentido del viento y se reducirá a menores velocidades del viento. También, la captación de las gotas por los árboles y arbustos adyacentes puede reducir la deriva, en comparación con las cifras de peor caso modelado.

En ambientes sensibles, de gran biodiversidad, el riesgo para especies vegetales no blanco se puede disminuir mediante varias medidas de mitigación. Un primer acercamiento sería emplear boquillas de aspersión que produzcan gotas más grandes, especialmente la boquilla de chorro sólido D10. Esto reducirá significativamente la deriva de la aspersión. También se pueden implementar zonas no asperjadas de amortiguación o áreas blanco de aspersión reducida, particularmente en sentido del viento, para proteger las áreas sensibles. Este abordaje se utiliza regularmente para maquinaria de aplicación terrestre, por ejemplo, adyacente a fuentes de agua. Otro abordaje podría ser utilizar adyuvantes para control de la deriva, aunque se ha reportado que éstos tienen poco efecto en las distancias de deriva letal o nociva con glifosato, cuando se comparan con la reducción en la deriva de los tipos alternos de boquillas (Johnson et al., 2006).

El transporte de partículas de la deriva de la aspersión a larga distancia es muy leve y no constituye problema para los humanos o para el medio ambiente más allá de los 50 m en sentido del viento a la máxima velocidad de viento permitida de 9 km/h para operaciones de aspersión. El movimiento del glifosato por fuera del límite será insignificante, si se utilizan amortiguadores apropiados, e inexistente, si la dirección del viento durante la aspersión es en sentido contrario del límite.

REFERENCIAS

AgDRIFT. 2008. Drift Filtration By Natural and Artificial Collectors: A Literature Review, AgDRIFT, Accessed, June 17, 2008. http://www.agdrift.com/PDF_FILES/drift_filtration.PDF

- ASTM. 1987. Standard Practice for Determining Data Criteria and Processing for Liquid Drop Size Analysis, Technical Report E799 - 03, American Society of Testing Materials.
- Bernal, M. H., and Solomon, K. R. 2008. Toxicity of glyphosate and Cosmo-Flux® to larval and juvenile Colombian frogs 2. Field and laboratory microcosm acute toxicity, *J. Toxicol. Environ. Hlth.*, In this series.
- Bilanin, A. J., Teske, M. E., Barry, J. W., and Ekblad, R. B. 1989. AGDISP: The aircraft spray dispersion model, code development and experimental validation, *Trans. Am. Soc. Agric. Engin.*, 32:327-334.
- Bird, S. L., Perry, S. G., Ray, S. L., and Teske, M. E. 2002. Evaluation of the AGDISP aerial spray algorithms in the AgDRIFT model, *Environ. Toxicol. Chem.*, 21:672-681.
- Brain, R. A., and Solomon, K. R. 2008. Comparative hazards of glyphosate, other pesticides, and other human activities to amphibians in the production of coca, *J. Toxicol. Environ. Hlth.*, Submitted.
- Dodge, L. G. 1988. Representation of average drop sizes in spray, *J. Prop. Power.*, 4:490-496.
- Edgington, A. N., Sheridan, P. M., Stephenson, G. R., Thompson, D. G., and Boermans, H. J. 2004. Comparative effects of pH and Vision herbicide on two life stages of four anuran amphibian species, *Environ. Toxicol. Chem.*, 23:815-822.
- Foster, M. P., and French, H. M. 1992. A new wind tunnel facility for atomization studies, in *Conference of Engineering in Australia*, Albury, New South Wales, Australia.
- Hewitt, A. J. 1994. Measurement Techniques for Atomization Droplet Size Spectra Using Particle Size Analyzers in Wind Tunnels, Technical Report T94-001, EPA MRID 43485603, Spray Drift Task Force Report.
- Hewitt, A. J. 1997. The importance of droplet size in agricultural spraying, *Atomization and Sprays*, 7:235-244.
- Hewitt, A. J., Johnson, D., Fish, J. D., Hermansky, C. G., and Valcore, D. L. 2002. The development of the spray drift task force database on pesticide movements for aerial agricultural spray applications, *Environ. Toxicol. Chem.*, 21:648-658.
- Hewitt, A. J., Teske, M. E., and Thistle, H. E. 2001. The development of the AgDRIFT® model for aerial application from helicopters and fixed-wing aircraft, *Aust. J. Ecotoxicol.*, 8:3-6.
- International Court of Justice. 2008. Ecuador institutes proceedings against Colombia with regard to a dispute concerning the alleged aerial spraying by Colombia of toxic herbicides over Ecuadorian territory, International Court of Justice, Accessed, June 12, 2008. <http://www.icj-cij.org/docket/files/138/14470.pdf>
- Johnson, A. K., Roeth, F. W., Martin, A. R., and Klein, R. N. 2006. Glyphosate spray drift management with drift-reducing nozzles and adjuvants, *Weed Technol.*, 20:893-897.
- Marshall, E. J. P., Solomon, K. R., Carrasquilla, G., Roa, J., and Henao, A. 2008. Impacts of different adjuvants and glyphosate formulations on the control of coca (*Erythroxylum coca*), *J. Toxicol. Environ. Hlth.*, Accepted 2008 08 07.
- Raupach, M. R., Woods, N., Dorr, G., Leys, J. F., and Cleugh, H. A. 2001. The entrainment of particles by windbreaks, *Atmos. Environ.*, 35:3373-3383.
- Snyder, H. E., Senser, D. W., and Lefebvre, A. H. 1989. Experimental techniques for drop-size measurements in fan sprays, in *Proceedings of the International Institutes for Liquid Atomization and Spray Systems - Americas*, Worcester, MA, USA: International Institutes for Liquid Atomization and Spray Systems, pp. 56-61.
- Solomon, K. R., Anadón, A., Carrasquilla, G., Cerdeira, A., Marshall, J., and Sanin, L.-H. 2007. Coca and poppy eradication in Colombia: Environmental and human health assessment of aerially applied glyphosate, *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, 190:43-125.
- Solomon, K. R., and Takacs, P. 2002. Probabilistic risk assessment using species sensitivity distributions, in *Species Sensitivity Distributions in Ecotoxicology*, eds. Posthuma, L., et al., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, pp. 285-313.
- Thompson, D. G., Wojtaszek, B. F., Staznik, B., Chartrand, D. T., and Stephenson, G. R. 2004. Chemical and biomonitoring to assess

- potential acute effects of Vision herbicide on native amphibian larvae in forest wetlands, *Environ. Toxicol. Chem.*, 23:843-849.
- USEPA. 2001. Environmental Effects Database (EEDB). ECOTOX Database System, United States Environmental Protection Agency, Office of Pesticide Programs, Environmental Fate and Effects Division, United States EPA, Washington, D.C., Accessed, June 10, 2006. <http://www.epa.gov/ecotox/>
- Velini, E. D., Alves, E., Godoy, M. C., Meschede, D. K., Souza, R. T., and Duke, S. O. 2008. Glyphosate applied at low doses can stimulate plant growth, *Pest Manag. Sci.*, 64:489-496.
- Wildlife International. 2006. Glyphosate-Cosmo-Flux® - Coca Mix: A 96-Hour Static-Renewal Acute Toxicity Test with the African Clawed-Frog Tadpole (*Xenopus laevis*). Final Report, Technical Report 628A-101, Wildlife International.
- Wojtaszek, B. F., Staznik, B., Chartrand, D. T., Stephenson, G. R., and Thompson, D. G. 2004. Effects of Vision herbicide on mortality, avoidance response, and growth of amphibian larvae in two forest wetlands, *Environ. Toxicol. Chem.*, 23:832-842.