



# Cámaras de Flujo

*y sus aplicaciones para evaluación de escenarios de Intrusión de Vapores*

## White Paper

# Cámaras de Flujo y sus aplicabilidades para evaluación de escenarios de Intrusión de Vapores

José Carlos Rocha Gouvêa Júnior<sup>1</sup>; Marcio Costa Alberto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Geólogo, Dr. – CSN – Gerente de Proyectos y Pasivos Ambientales – Companhia Siderúrgica Nacional y Vicepresidente de NICOLE Latin America ([jose.gouvea@csn.com.br](mailto:jose.gouvea@csn.com.br))

<sup>2</sup> – Geólogo, Dr. ([mrалberto@geoinovacoes.com.br](mailto:mrалberto@geoinovacoes.com.br))

## Agosto • 2021

Documento desarrollado junto con el Grupo de Trabajo de Intrusión de Vapores de la red NICOLE Latin America y publicado en agosto de 2021.

## I. Introducción

Uno de los grandes retos actuales del escenario de intrusión de vapores se refiere a la determinación de la relación de la presencia de vapores del suelo con riesgos a la salud humana por inhalación de vapores provenientes de ellos.

El hecho está en la dificultad en asociar los contaminantes detectados en la fase vapor en los suelos con aquellos detectados en el aire ambiente de edificaciones, debido a la posibilidad de que haya interferencia de contaminantes ya existentes en el propio ambiente.

Lo que se aplica hoy, con base en una premisa definida por USEPA – United States Environmental Protection Agency, es utilizar un factor de atenuación ( $\alpha$ ) de 0,03 en todos los casos, como base para hacer la evaluación de riesgos a la salud humana para este escenario, aunque diferencias mediciones realizadas en campo hayan indicado valores diferentes, menos conservadores.

Así, el uso de herramientas que posibiliten la evaluación de estos escenarios de manera más precisa es una necesidad urgente.

Una de esas herramientas es la cámara de flujo (o flux chamber), cuya utilización ha crecido en Brasil los últimos años. Los objetos del uso de esta herramienta son: (i) determinar la concentración potencialmente proveniente de vapores acumulados bajo las edificaciones, y (ii) subsidiar el cálculo del factor de atenuación.

Considerando la relevancia de este tema, en el presente artículo presentamos un resumen de esta herramienta, con sus debidas aplicabilidades, presentando también las ventajas y desventajas de su uso como apoyo en la solución de problemas asociados a la intrusión de vapores.

## II. Cámaras de Flujo (Flux Chambers)

Según Hartman (2003), determinar flujos verticales de contaminantes en fase vapor, a partir del uso de datos obtenidos a través de análisis en matrices ambientales originadas de ambientes subsuperficiales (por ejemplo, suelo, aguas subterráneas, vapores del suelo), requiere la aplicación de modelos matemáticos o el uso de factores de atenuación para prever las concentraciones de los contaminantes con potencial para migrar hacia el interior de edificaciones existentes en la superficie del terreno.

Factores de atenuación (por ejemplo, factor de atenuación alfa –  $\alpha$  – calculado a partir del algoritmo de JOHNSON & ETTINGER, 1991) se definen como la proporción entre las concentraciones presentes en la fuente de contaminación subsuperficial y las concentraciones medidas en el interior de ambientes cerrados, comúnmente calculados a partir de concentraciones determinadas en agua subterránea y/o en el perfil del suelo, utilizándose la constante de Henry específica a cada contaminante para prever su partición a la fase vapor.

Actualmente, los factores de atenuación previstos en los modelos todavía no poseen validación de campo por datos empíricos, considerando que no hay, hasta el presente, una base de datos acumulados suficiente para este tipo de análisis. Así, el abordaje usual en las guías y manuales disponibles en nivel mundial recomienda el uso de factores de atenuación genéricos, que pueden ser conservadores en diferentes órdenes de magnitud una vez que no incluyen, en su rutina de cálculo, variables importantes del medio físico, que presentan determinación compleja.

Por consiguiente, hay la posibilidad de obtenerse una falsa conclusión sobre la incidencia de riesgos a partir de evaluaciones realizadas con el uso de datos obtenidos exclusivamente en subsuperficie, especialmente cuando datos geotécnicos específicos del área que se investiga no están disponibles.

En este contexto, el uso de cámaras de flujo, comúnmente referidas en la literatura específica como flux chambers, provee una medida directa de las concentraciones de los contaminantes existentes en subsuperficie, disminuyendo las incertitudes introducidas por el uso de modelos predictivos de flujos verticales ascendentes o por el uso de factores de atenuación genéricos y conservadores del punto de vista de protección.

Teóricamente, las concentraciones medidas con el uso de cámaras de flujo reflejan los efectos de los procesos de transporte y destino de contaminantes en subsuperficie que, operacionalmente, pueden presentar determinación difícil, como partición entre fases, biodegradación, presencia de caminos artificiales, permeabilidad de losa de concreto, entre otros factores.

También se pueden utilizar cámaras de flujo para hacer la estimación predictiva para edificaciones nuevas, donde los pisos y losas se instalarán sobre una reja y en terrenos sin ningún tipo de pavimento, en que se pretende, en un escenario de ocupación futuro, construir una edificación, considerando que los efectos relacionados a esta nueva construcción se conozcan durante la interpretación de los resultados.

En dichos casos, se recomienda realizar mediciones en cantidad suficiente para garantizar que las variaciones espaciales alrededor de la huella de la edificación (límite del área prevista para la construcción

de la edificación) sean cubiertas adecuadamente, debido a la probabilidad de la existencia de posibles caminos preferenciales (por ejemplo, unión de la fundación con la losa/piso). Además, las mediciones se deben hacer por un periodo de tiempo suficiente para garantizar que las variaciones temporales en el flujo sean representativas.

Sin embargo, así como para el caso de otras técnicas disponibles, el uso de cámaras de flujo no se aplica a todas las situaciones y se deben conocer sus limitaciones para la aplicación correcta del método. Ejemplos de estas limitaciones incluyen:

**a) Ambientes confinados:** La aplicación de cámaras de flujo en sótanos o en otro tipo similar de ambiente confinado puede no ser posible, porque las paredes laterales que limitan el sótano también pueden poseer contaminaciones, así caracterizando potenciales fuentes para el proceso de intrusión de vapores que no se medirán adecuadamente en este tipo de abordaje.

**b) Evaluación de escenarios futuros:** Durante la evaluación del proceso de intrusión de vapores en escenarios de utilización futura (por ejemplo, lotes no urbanizados, terrenos donde se prevé la construcción de emprendimientos residenciales, industriales, etc.), mediciones hechas con cámaras de flujo pueden ser sobrestimadas debido a la ausencia de estructuras impeditivas para que se establezcan flujos verticales de vapores, como fundaciones, pisos o losas. En cambio, las medidas de flujo también se pueden sobrestimar debido a la falta de flujo de advección inducido por la presión que hace la edificación sobre el suelo, cambio de temperatura y la presencia de sistema de ventilación posiblemente instalados en las estructuras que formarán la futura edificación, entre otros factores.

**c) Ausencia de previsibilidad respecto puntos preferenciales para intrusión de vapores en edificaciones:** En muchas edificaciones, especialmente las más antiguas, las zonas más permeables normalmente se localizan en la unión entre la altura de la fundación y la losa/piso (o sea, cerca de las paredes) o de conductos (por ejemplo, líneas de servicio público, utilidades subterráneas y tuberías) que se proyectan a través de las paredes o losas. Como las formas usuales de las cámaras de flujo no permiten mediciones en dichos locales, hay preocupación de que los valores medidos sean inferiores a los flujos reales existentes en estas situaciones.

**d) Representatividad de las condiciones de flujo de aire en el interior de ambientes cerrados:** Las condiciones de flujo de aire dentro de una cámara de flujo pueden no corresponder a las condiciones de flujo de aire en un ambiente cerrado. Si el flujo de aire en el ambiente cerrado es pequeño, los flujos podrán reducirse. Si las condiciones de flujo de aire en la cámara son más altas que el ambiente cerrado, los flujos medidos podrán sobrestimarse, en el caso de que se cree una orientación ascendente, o subestimados, si el flujo en el interior de la cámara es descendente, empujando el aire hacia subsuperficie.

Observados los escenarios más propicios y las limitaciones a la aplicación de la técnica, se debe elegir el método más adecuado para realizar las mediciones con la utilización de cámara de flujo. Actualmente, hay dos abordajes para realizar mediciones utilizando cámaras de flujo:

- ✓ Cámara de flujo estática (cerrada) y;
- ✓ Cámara de flujo dinámica.

Ambos los métodos ofrecen ventajas y desventajas, según se describe a continuación.

**Cámara de flujo estática:** Según descrito por Hartman (2003), durante la aplicación de este método no hay introducción de gas en la cámara durante el periodo de muestreo. Los contaminantes en fase de vapor fluyen naturalmente al interior de la cámara y permanecen paralizados. Se sacan muestras discretas para análisis en el final del periodo de estabilización o, preferentemente, en intervalos regulares de tiempo durante el periodo de muestreo.

Esencialmente, la cámara representa un pequeño ambiente cerrado, con la excepción de no ocurrir cambios de aire, lo que provee una muestra integrada en el tiempo, de manera similar a una muestra colectada en un canister, durante un periodo de tiempo específico.

El sistema de muestreo, según se ilustra en la Figura 1, es simple, esencialmente compuesto de un contenedor con puertas de muestreo, donde se conectan los equipos para colectar las muestras, seleccionados según el proceso analítico que se utilizará para determinar las concentraciones de los analitos (por ejemplo, canisters, jeringas, tubos rellenos con resinas absorbentes, TedLar Bags, etc.). Las cámaras se pueden construir con el uso de diferentes materiales, siempre que sean inertes, no absorbentes y con la menor cantidad posible de rugosidad y partes ásperas, como acero inoxidable pulido, acrílico y vidrio.

Figura 1 - Cámara de flujo estática con canister conectado a la puerta de muestreo, listo para colecta.



Fuente: Modificado de ENTECH Instruments (2018).

Este cambio ofrece diferentes ventajas operacionales respecto el uso de cámaras de flujo dinámicas, incluyendo:

- a) Los equipos y procesos son sencillos y menos costosos, permitiendo la implantación de diferentes cámaras en el mismo periodo de tiempo, ofreciendo mejor cobertura del lugar/edificación investigada;
- b) El método provee una muestra integrada en el tiempo, por largos periodos, reflejando cualesquier cambios de flujo existentes debido a efectos temporales;
- c) El sistema y los procesos relativamente sencillos minimizan la probabilidad de ocurrencia de posibles falsos positivos;
- d) La ausencia de flujo de entrada y salida de gases minimiza posibles disturbios de las condiciones de flujo natural (por ejemplo: generación de gradientes de flujo advectivo o de presión en el interior de la cámara);
- e) El método es más sensible (o sea, puede detectar flujos más bajos), porque no hay gas de entrada diluyendo la concentración de contaminantes en el interior de la cámara, con la ocurrencia de acúmulo de concentraciones a lo largo del tiempo;
- f) Los límites de detección analítica aumentan, permitiendo mediciones menos costosas, incluyendo la aplicación de técnicas de medición en tiempo real, realizadas en campo;
- g) Límites más altos de detección reducen el potencial de falsos positivos;
- h) La interpretación de los valores medidos es relativamente más sencilla.

Las concentraciones medidas se pueden comparar directamente a los niveles objetivo o valores aceptables para exposición al aire interno y/o al flujo de vapores, utilizándose las relaciones en las Ecuaciones 1 y 2 a continuación:

**Ecuación 1**

$$C_{\text{ambiente cerrado}} = \frac{C_{\text{cámara}} * H_{\text{cámara}}}{H_{\text{ambiente cerrado}}}$$

**Ecuación 2**

$$Flujo = \frac{C_{\text{cámara}} * V_{\text{cámara}}}{A_{\text{cámara}} * T}$$

Dónde:

C = concentración

H = Altura

V = Volumen

A = Área

T = Tiempo de muestreo

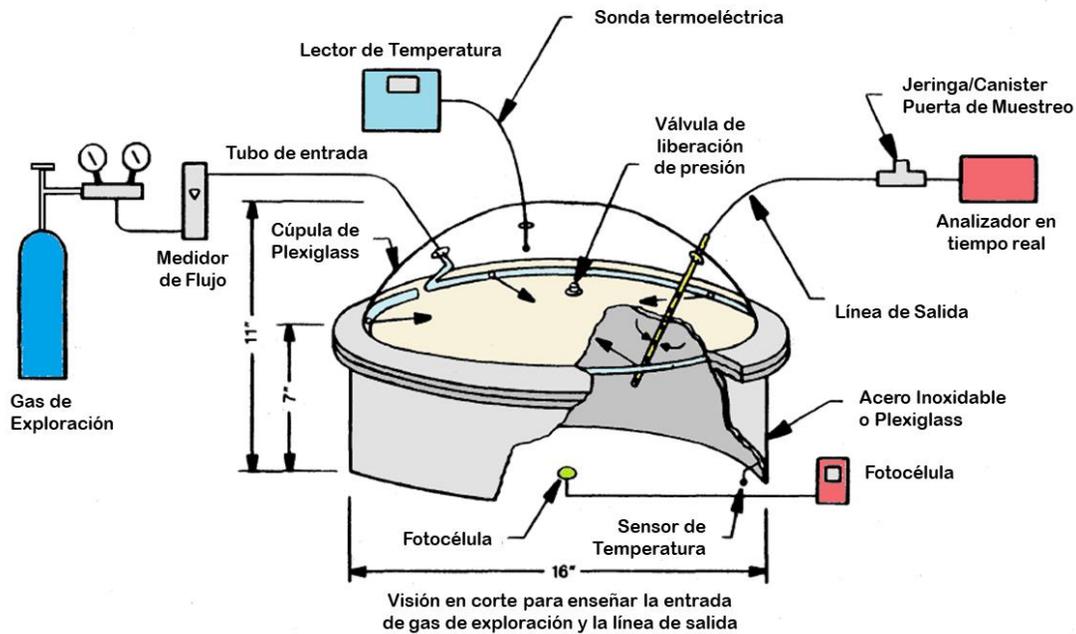
Sin embargo, hay una gran desventaja en el uso del método estático, porque, si las concentraciones en la cámara acumulan una fracción significativa de la concentración presente en subsuperficie, el flujo de contaminantes se podrá impedir. Según la ley de Fick, el flujo se relaciona directamente con el gradiente de concentración. Por ejemplo, una reducción del 20% en el gradiente de concentración llevará a una reducción del 20% del flujo. Para lugares en que se sabe que las emisiones son elevadas (por ejemplo: cerca de aterros sanitarios), la reducción de flujo causada por el acúmulo de concentración puede ser negativa. No obstante, para la mayoría de las aplicaciones, el aumento esperado para las concentraciones no es significativo.

Cualquier reducción de flujo puede ser medida, identificada y corregida a través de la medición periódica de la concentración en la cámara durante el periodo de muestreo.

Si los niveles de detección de laboratorio necesarios pueden alcanzarse, se recomienda el uso de laboratorios muebles para permitir la obtención de un feedback en tiempo real. Como alternativa, se pueden coleccionar diferentes muestras a partir de la cámara durante el periodo de muestreo para análisis de laboratorio externas. Si la concentración medida en la cámara está en un rango inferior al 25% de la concentración determinada en muestras subsuperficiales de vapores en el suelo, es posible que el flujo medido se haya subestimado.

**Cámara de flujo dinámica:** Este método fue descrito inicialmente en la Guía del Usuario de Radian (KIENBUSCH, 1986). En este método, se introduce un gas de entrada (gas de exploración) continuamente en la cámara de flujo durante el periodo de muestreo y se libera una cantidad equivalente del gas de la cámara, según el diagrama de corte de la Figura 2 donde se puede ver el sistema de montaje de una cámara de flujo dinámica y los equipos para monitoreo normalmente empleados en campo durante el proceso de muestreo.

Figura 2 - Diagrama en corte ilustrando el sistema de montaje de una cámara de flujo dinámica y los equipos de soporte utilizados durante el proceso de muestreo.



Fuente: Modificado de Kienbusch (1986).

Se entiende que el sistema atinge una concentración en estado de equilibrio después de cuatro o cinco tiempos de permanencia en la cámara, donde un tiempo de permanencia es igual al volumen de la cámara dividido por la tasa de flujo del gas de exploración. Cuando llega a la condición de equilibrio, la concentración de contaminantes en el gas liberado debe ser equivalente a la concentración existente en el interior de la cámara.

Se monitorea la concentración del gas liberado con un medidor portátil o a partir de análisis químicos, dependiendo del límite de detección necesarios a la evaluación que se está haciendo. Para aplicaciones basadas en riesgo, que requieren bajos límites de detección, el abordaje típico consiste en la colecta de una muestra de lote del gas de salida para análisis de laboratorio, después que se establezcan las condiciones de equilibrio (aproximadamente 30 minutos, según se describe por KIENBUSCH (1986)).

La principal ventaja que ofrece ese método en comparación con el uso de cámaras estáticas es que, excepto por casos más extremos, hay baja probabilidad de la concentración de la cámara acumular una fracción significativa de la concentración de subsuperficie debido al flujo de entrada y salida del gas de exploración. Por lo tanto, la probabilidad de que el flujo medido se impida por el acúmulo de concentración en el interior de la cámara es muy baja. Sin embargo, el uso de cámaras dinámicas presenta diferentes desventajas operacionales y técnicas, como:

- a) Este proceso más complejo requiere el empleo de equipos más sofisticados. Además de la cámara, el equipo necesario incluye tanque de gas, reguladores de flujo, conexiones, tuberías, manómetros y recipientes de muestreo más grandes, normalmente equipados con bloqueadores de flujo;
- b) El potencial de falsos positivos es más grande que en el método estático, especialmente cuando se reutiliza el equipo en el mismo lugar y el mismo día;
- c) El equipo más sofisticado y costoso limita la implantación de diferentes cámaras, para más cobertura espacial y de largos periodos de tiempo, de manera simultánea;
- d) La alta dilución del volumen en la cámara, debido al uso del gas de exploración, resulta en una pérdida de sensibilidad en un factor de 60 a 500 en comparación con las cámaras estáticas, exigiendo límites de detección más bajos para realización de los análisis de laboratorio;
- e) Se debe esterilizar todo el equipo y los procesos de campos se deben conducir con bastante cuidado;
- f) La comparación directa de la concentración medida en la muestra colectada y de las concentraciones aceptables en tabla para ambientes internos no es posible, y el proceso para conversión de los resultados es complejo;
- g) El gas de exploración crea una perturbación en el flujo natural (por ejemplo: creación de flujo advectivo en el interior de la cámara). En la aplicación típica de este método, no hay medidas del flujo de aire liberado a partir de las puertas de salida. Sin dicha medición, no hay datos o control para determinar la dirección del flujo del gas de exploración, sea por las puertas o por el fondo de la cámara. Como el aire sigue el camino de menor resistencia, es razonable que se espere que una parte del aire escape por el fondo de la cámara, dependiendo del coeficiente de permeabilidad del suelo;
- h) En caso de que este escenario se configure, puede haber resistencia al flujo natural. Las mediciones de presión, que generalmente se realizan para resolver dicho problema, no proveen indicación de la dirección del flujo y, por lo tanto, no resuelven la incertidumbre;
- i) Otra grande desventaja de este método es su limitación para medir cualesquier cambios temporales a lo largo del día, debido a premisa de la existencia de un flujo constante (condiciones de equilibrio) en el interior de la cámara. Los estudios de caso documentan claramente que las emisiones a partir del suelo varían a lo largo del día y mismo el reporte Radian reconoce que este factor limita la aplicación del método. Como el tiempo de permanencia del aire en la cámara es muy corto, una muestra discreta colectada al final de un periodo de muestreo refleja solamente los últimos 30 minutos, a pesar de la duración del periodo de muestreo. Dicha limitación se puede eliminar si una fracción del gas de exploración se colecta continuamente en la puerta de salida durante un periodo de muestreo más largo.

### III. Conclusiones

Según resumen presentado sobre las cámaras de flujo, se puede concluir que esta herramienta puede auxiliar la evaluación de los escenarios de intrusión de vapores, cuando posibilita:

- a) determinar la concentración potencialmente proveniente de vapores acumulados bajo las edificaciones,
- b) reducir los efectos de la interferencia de fuentes externas en la colecta de muestras de aire ambiente,
- c) subsidiar el cálculo del factor de atenuación, y
- d) permitir más precisión y reducir incertidumbres en la definición de riesgos a la salud humana.

Entre las dos formas de utilizarse las cámaras, se verifica que la cámara de flujo estática (cerrada) presenta algunas ventajas en comparación con la cámara de flujo dinámica, entre ellas menor costo de implantación, uso de menos equipos y accesorios, menos interferencia durante el proceso de colecta y la posibilidad de instalar más de una cámara, posibilitando más amplitud espacial y temporal de las muestras.

Es un hecho que toda técnica de investigación presenta sus ventajas y desventajas y deben considerarse cuando realizadas las investigaciones para evaluación de intrusión de vapores, considerando todas las incertidumbres e imprecisiones asociadas a la técnica en la interpretación de los resultados.

Por la necesidad de investigarse con más profundidad los escenarios de intrusión de vapores, se deben iniciar investigaciones específicas con esta herramienta, para determinar procesos específicos, con vistas a hacer normas de su uso, adaptado a las realidades brasileñas, porque toda y cualquier herramienta puede y debe utilizarse para subsidiar: (i) la protección de los receptores a los riesgos de inhalación de vapores, (ii) más precisión en la evaluación de riesgos a la salud humana, (iii) conocer los mecanismos de transporte y destino de los vapores provenientes del suelo al interior de edificaciones, (iv) posibilitar el cálculo de factor de atenuación específico al área estudiada, y (v) permitir la creación de un banco de datos brasileño con datos sobre este escenario y que posibilite el uso por las esferas reguladoras y de inspección.

#### IV. Referencias

ENTECH INSTRUMENTS (California). Soil Gas: Sampling Solutions. 2018. Disponible en: <<https://www.entechinst.com/featured-products/Soil-Gas-Monitoring-Solutions/Chameleon>>. Acceso el: 30 oct. 2018.

HARTMAN, Blayne. How to Collect Reliable Soil-Gas Data for Upward Risk Assessments: Part 2: Surface Flux-Chamber Method. Lustline Bulletin. New England, p. 14-34. ago. 2003.

JOHNSON, P. C.; ETTINGER, R. A.. Heuristic Model for Predicting the Intrusion Rate of Contaminant Vapors into Buildings. Environmental Science & Technology, Houston, v. 25, n. 8, p.1445-1452, 1991.

KIENBUSCH, M. R.. Measurement of Gaseous Emission Rates from Land Surfaces Using An Emission Isolation Flux Chamber: Users Guide. Austin: US EPA, 1986. 58 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Draft Guidance for Evaluating the Vapor Intrusion to Indoor Air Pathway from Groundwater and Soils. United States of America: United States Environmental Protection Agency, 2002. 53 p.