

Límites Mortales en los Espacios Confinados Bolivianos

La característica geográfica que define a Bolivia, por encima de su diversidad, es la cualidad andina. Internacionalmente, nuestro país es reconocido e identificado por sus ciudades en altura y los habitantes que la conforman, ya adaptados a esta caprichosa configuración.

Esta virtud hace que muchos procesos, equipos, sistemas e incluso personas; concebidas en ciudades de más baja altura, no funcionen adecuadamente en las particularidades de las ciudades bolivianas de altura, obligando a los usuarios a verificar especificaciones, consultar con los proveedores o realizar cálculos de corrección para tener un valor mucho más real en estas condiciones.

Bajo esta premisa, en este ensayo se analizará de manera técnica el límite inferior de oxígeno propuesto por normativa del 18% v/v (el cual, la NTS justifica por: *“las características atmosféricas de nuestro país... como se establece el art. 78 del DL N° 16998”* - crf.: Anexo B – NTS-008) contrastando su interpretación, su rigor académico, la manera que lo miden los equipos principales de monitoreo usados en nuestra región; y por sobre todo, el criterio de protección y seguridad para los entrantes al espacio confinado.

No hay oxígeno en la altura

Uno de los paradigmas mal estructurados en relación al trabajo en altura geográfica es el de la: “falta de oxígeno”. Muchos creen que “no hay oxígeno en la altura”. Esta falacia está mal estructurada puesto que la concentración de oxígeno no cambia. El aire siempre tendrá las mismas proporciones de nitrógeno (78%), oxígeno (20,9%), argón y otros gases (1%), en cualquier ciudad o parte del mundo.

Entonces, ¿Qué cambia a medida que subimos geográficamente? – la presión atmosférica. Una manera tácita de definirla puede ser: “el peso del aire sobre el mundo y sus habitantes”. A medida que uno sube, hay menos aire (menos peso) y por tanto menos presión atmosférica, P_{atm} .

Para el caso boliviano, Santa Cruz de la Sierra presenta una P_{atm} de 719.74 mmHg, Cochabamba de 546.67 mmHg y La Paz con un valor de 492 a 495 mmHg. En una relación de proporcionalidad; si baja la presión atmosférica, la presión parcial de O_2 también baja conforme su porcentaje de composición ($PO_2 = 0.209 \times P_{total}$).

La presión parcial de oxígeno (PO_2) es la responsable de sentir “esa falta de oxígeno”; ya que estas moléculas están mas sueltas a medida que sube en altura geográfica. Esto hace que en cada respiración ingresen menos moléculas para cumplir las funciones vitales en las personas. Esta sensación, que muchas veces se la denomina como *mal de altura*, es la responsable fisiológica de: respirar más rápido, aumentar el ritmo cardíaco, y a largo plazo producir más glóbulos rojos, a fin de compensar esa “disminución de oxígeno”. Por eso se requiere una adaptación o *aclimatación* para adaptar el cuerpo a estas nuevas condiciones.

Entonces, desvelando el mito del oxígeno en altura, se puede concluir enfáticamente que: 1) la proporción de oxígeno no cambia en el volumen total de aire atmosférico; y 2) Pensar que en las ciudades de altura existe “menos oxígeno” es un error conceptual durísimo que puede costar mucho al momento de regular la normativa boliviana en materia SST.

Efectos fisiológicos a una exposición a una atmósfera con una concentración del 18% de O₂

El oxígeno del aire juega un rol importante en los procesos biológicos esenciales de los seres vivos. Las concentraciones normales deben estar próximas al 20,9%; sin embargo, la reducción de este porcentaje, ya sea por un efecto químico o físico de desplazamiento, puede llegar a comprometer la vida de quienes están expuestos a esta atmósfera deficiente.

De manera fisiológica, los seres humanos pueden estar en ambientes donde la concentración en volumen de oxígeno baja hasta el 19% v/v; por debajo de este se encuentra el umbral de peligro seteado a 18% v/v. La literatura indica que los efectos más comunes son: la hipoxia leve, fatiga en esfuerzo físico y dificultad de concentración. El valor crítico empieza en el 16% de concentración (Dolor de cabeza, mareos, taquicardia), que en su cuenta regresiva asegura el peor final posible para los expuestos.

Regulaciones internacionales sobre concentración de oxígeno en espacios confinados

La preocupación global sobre la concentración de oxígeno en ambientes laborales nace en el trabajo de espacios confinados. Actualmente existen 4 normativas internacionales que dan luces sobre tópicos: La OSHA 1910.146 (*Permit-required confined spaces*) (3), la ANSI/ASSP Z117.1 (*Standard for safe work in confined spaces*) (4), la NTP 223 (*Trabajos en recintos confinados*) y la NFPA 306 (*Standard for the Control of Gas Hazards on Vessels*) (6). Los valores de concentración de oxígeno en volumen que entregan se detallan a continuación:

Norma / Referencia	Límite inferior O ₂	Condición de entrada
OSHA 1910.146	19.5 %	Por debajo de este valor, se considera atmósfera deficiente, se requiere aire suministrado.
ANSI/ASSP Z117.1	19.5 %	
NTP 223	19.5 %	
NFPA 306	19.5 %	Se requieren acciones correctivas antes del ingreso
NTS-008 (Bolivia)	18%	Mínimo legal; por debajo se requiere uso de equipos autónomos o semiautónomos de suministro de aire.

Tabla 1. Valores umbrales límite para O₂ en los espacios confinados (fuente: elaboración propia)

Como se puede apreciar en la tabla anterior, mientras el mundo regula un tópico de seguridad centrado en el valor inferior de 19.5%, Bolivia ratifica un valor mucho más bajo en coherencia con su vetusta legislación.

La medición electroquímica del oxígeno en los ambientes

La tecnología actual disponible para medir la concentración de oxígeno se basa en celdas electroquímicas de Pilas Galvánicas. El principio radica en la generación de electricidad mediante reacciones químicas. En este caso, el oxígeno que difunde a través de una

membrana reacciona químicamente en un cátodo y un ánodo, generando una corriente proporcional a su concentración; el instrumento traduce esa señal en % de O₂ en el aire.

Este sistema mide el flujo de moléculas, no la presión parcial, por lo que factores como la altitud (presión baja), humedad o temperatura pueden afectar la exactitud y el tiempo de respuesta en la lectura directa de este parámetro.

La naturaleza química del proceso de monitoreo genera un retardo propio en la lectura de la concentración de oxígeno. Este valor es proporcionado por las especificaciones de la celda, que en muchos casos no es entregado en el propio manual del equipo. A este valor se denomina t_{90} (tiempo de respuesta) y se define como el intervalo que tarda un sensor en reflejar el 90 % de un cambio real en la concentración de gas una vez que este llega al detector. En otras palabras, si el oxígeno del aire cae bruscamente, el sensor no muestra el nuevo valor de inmediato: necesita algunos segundos para que el gas difunda a través de la membrana, reaccione químicamente dentro de la celda y se genere la corriente suficiente para entregar el valor.

Parámetro					
	MSA ALTAIR 4X (XCell O ₂)	Dräger X-am 5000 (XXS O ₂)	Honeywell BW MicroClip	Honeywell BW Quattro	Riken Keiki GX-3R
Tipo de sensor	Electroquímico galvánico (XCell)	Electroquímico galvánico (XXS)	Electroquímico	Electroquímico	Electroquímico (O ₂)
Rango O ₂	0–30 % v/v	0–25 % v/v	0–30.0 %	0–30.0 %	0–40.0 % v/v
Resolución	0.1 % v/v	0.1 % v/v	0.1 % v/v	0.1 % v/v	0.10 % v/v
t_{90} (tiempo de respuesta)	< 10 s	≤10 s	≤15 s	≤15 s	Dentro de 30 segundos
IP / Robustez	IP67	Resistente agua/polvo	—	—	IP66/68
Rango de operación por Presión, declarado por fabricante	800–1200 mbar	700–1300 hPa	No declarado	80–120 kPa	70–120 kPa
Uso en altura geográfica	No declarado	No declarado	No declarado	No declarado	≤3 000 m

Tomando en cuenta las especificaciones técnicas de los principales equipos de monitoreo de gases comercializados en Bolivia, se puede contar con el siguiente resumen técnico:

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los distintos equipos usados en Bolivia (fuente: elaboración propia)

En la tabla anterior, el valor t_{90} no quiere decir que “el equipo demora 10 segundos en darte la lectura”, sino que necesita 10 segundos para reflejar el 90 % del cambio real de concentración después de que el gas llega efectivamente a la celda. Es decir, si el oxígeno dentro de un espacio confinado cae bruscamente, el instrumento mostrará un valor aproximado en los primeros segundos, y recién a los 10 segundos la lectura estará muy cerca (casi al 90 %) del valor real.

A modo de ejemplo, si usted mide afuera de un espacio confinado 20.9 % de O_2 ; y suponiendo que al ingresar a un tanque el valor real dentro es 16 % se tendrá el siguiente comportamiento del sensor en función del tiempo:

- En el instante que el aire entra al sensor, la pantalla aún marca 20.9 %.
- Después de 2 s, el equipo mostrará ~18 %.
- Después de 5 s, ya marcará ~17 %.
- Después de 10 s, llegará a ~16.1 % (el 90 % del cambio total).
- Recién luego de 15–20 s se estabilizará completamente en 16 %.

Es importante entender que la lectura mostrada en cualquier equipo, siempre estará detrás del valor real, causado por las condiciones tan complejas que puede entregar un espacio confinado.

La situación se enreda cuando se usa bombas de muestreo, ya que el gas muestreado debe recorrer todo el equipo antes de llegar al sensor. En estos casos se debe tomar en cuenta las siguientes fórmulas para encontrar el tiempo de retardo final antes de tomar una lectura más precisa:

$$T_{\text{total}} = T_{\text{recorrido gas}} + t_{90} \quad (1)$$

$$T_{\text{recorrido gas}} = \text{longitud de manguera (m)} / \text{Velocidad de aspiración (m/s)} \quad (2)$$

Las velocidades de aspiración son provistas por los fabricantes y deben ser consideradas en estos cálculos. Por ejemplo, si usted tiene una manguera de 5 metros, la velocidad de flujo está dada por 0.3 m/s, y su equipo tiene un t_{90} de 10 segundos, el tiempo de retardo será:

$$T_{\text{recorrido gas}} = 5 \text{ (m)} / 0.3 \text{ (m/s)} = 16.67 \text{ s}$$

$$T_{\text{total}} = 16.67 + 10 \sim 27 \text{ segundos.}$$

En este caso, para un espacio confinado, el retardo en la lectura de oxígeno llega a 27 segundos, el cual puede ser mortal en condiciones operacionales anormales de trabajo en un recinto cerrado.

El peligro de trabajar con el límite inferior al 18% de O_2 v/v

En este caso, seguir el límite inferior de 18% O_2 v/v puede ser mortal en las operaciones de espacios confinados definidos en Bolivia. Esto debido a que:

- No todos los profesionales conocen el funcionamiento de la celda de oxígeno y el tiempo t_{90} de sus equipos, confiándose únicamente al valor puntual que miden de manera directa en el muestreo de gases de espacio confinado.

- Para atmósferas peligrosas, autorizar el ingreso con un valor puntual directo sería condenar al grupo entrante a una situación de desastre cuando los valores son próximos a ese 18%.
- En las operaciones de rescate, esperar a tomar decisiones en función del límite legal del 18%, puede significar que ya la gente dentro, esté ya en atmósferas deficientes de oxígeno, reduciendo sus probabilidades de supervivencia.
- Los tiempos de retardo pueden verse influenciados por la altitud geográfica de uso. En ciudades como Cochabamba, La Paz, Potosí, los equipos operan fuera de su rango certificado, lo que significa que su exactitud y el tiempo de respuesta pueden degradarse. Si sumamos esto a las condiciones de escenarios dinámicos (pérdidas súbitas o desplazamientos de gases pesados), la lectura puede ir atrasada varios segundos; ocultando el verdadero nivel peligroso que puede comprometer la conciencia y la capacidad de reacción del trabajador.

Quizá usted lea un “valor seguro legal” del 18% en su equipo, antes de tomar decisiones operacionales de seguridad en el espacio confinado; pero la realidad puede ser tan compleja, que quizá dentro ya se hay cruzado el umbral del 15% mortal para varios de los entrantes.

Consideraciones técnicas para mejorar la gestión en los trabajos de espacios confinados

Se debe partir del escenario que la ley da la base, nunca el techo. En ese sentido, y considerando lo expuesto en este ensayo técnico, usted debe adoptar medidas preventivas para gestionar los trabajos confinados con un límite inferior similar al que establecen las normas internacionales. Tomar acciones ante caídas bruscas, comportamientos anormales de las atmósferas monitoreadas y brindar mayor atención a las respuestas fisiológicas de los entrantes; puede significar la diferencia entre la vida y la muerte en estas tareas de alto riesgo.

Conclusiones

La concentración volumétrica de oxígeno (20,9 % v/v) no varía con la altitud, pero la presión parcial de oxígeno sí disminuye drásticamente; a 4000 m s.n.m. equivale a respirar aire con solo ~13 % de O₂ al nivel del mar. Esto significa que una atmósfera “segura” de 18 % en La Paz es fisiológicamente equivalente a unos 11–12 % al nivel del mar, ya dentro del rango de hipoxia severa.

Los detectores electroquímicos de O₂ presentan un t₉₀ promedio de 10 – 15 s; con mangueras de 5–10 m y velocidades de 0.3–0.6 m/s, el tiempo total de respuesta puede alcanzar 25–50 s, lo cual retrasa la detección real de una atmósfera peligrosa.

La mayoría de equipos (MSA, BW, Dräger, Riken) tienen rango de presión operativo mínimo entre 700–800 mbar, mientras que ciudades como La Paz (620–650 mbar) superan esos límites, degradando la exactitud y linealidad de la celda electroquímica.

La NTS 008 adopta un límite inferior de 18 % v/v, justificado por “características atmosféricas”, pero sin sustento técnico ni fisiológico actual; usar ese valor como criterio de

ingreso puede exponer a los trabajadores a hipoxia aguda antes de que el instrumento reaccione.

Aceptar el 18 % v/v como valor seguro puede ser legal, pero no responsable. Se debe tomar con cuidado estos valores a fin de garantizar la seguridad de los entrantes en los espacios confinados.

Finalmente, la seguridad basada en ciencia debe prevalecer sobre la seguridad basada en mínimos legales.

Bibliografía

1. Ministerio de Trabajo, Empleo y Previsión Social (Bolivia). (2017). NTS-008/17: Trabajos en espacios confinados (norma técnica). MTEPS.
2. Estado Plurinacional de Bolivia. (1979). Decreto-Ley 16998 – Ley General de Higiene y Seguridad Ocupacional y Bienestar, art. 78 (norma legal).
3. OSHA. (1993, enm.). 29 CFR 1910.146 – Permit-Required Confined Spaces (reglamento federal). U.S. Dept. of Labor.
4. ANSI/ASSP. (2022). Z117.1 – Safety Requirements for Entering Confined Spaces (estándar). American Society of Safety Professionals.
5. NFPA. (2019). NFPA 350: Guide for Safe Confined Space Entry and Work (guía técnica). National Fire Protection Association.
6. NFPA. (2003/2023). NFPA 306: Standard for the Control of Gas Hazards on Vessels (estándar; criterio $\geq 19,5$ % O_2 para “safe for workers”). National Fire Protection Association.
7. NIOSH/CDC. (2016). Respiratory Protection for Oxygen-Deficient Atmospheres (informe técnico). Centers for Disease Control and Prevention. (Justificación del 19,5 %).
8. NIOSH/CDC. (2003). NIOSH Method 6601 – Oxygen (Electrochemical Sensor) (método analítico; uso en atmósferas deficientes).
9. MSA Safety. (2024). ALTAIR 4X – Operator’s Performance/Operating Manual (manual del equipo). MSA. (Rangos, alarmas, recomendaciones, notas sobre O_2 /LEL).
10. Dräger. (2025). X-am 5000 – Instructions for Use / Technical Manual (manual del equipo). Drägerwerk AG. (t_{90} , uso con bomba, tiempos por manguera).
11. Dräger. (2025). X-am 2500/5000/5600 – Notes on approval / Sensor data (ficha sensores; supuestos de 20,9 % O_2 para fresh-air). Drägerwerk AG.
12. Honeywell BW. (2018). BW MicroClip Series – Datasheet y Manual de Usuario (fichas y manuales; t_{90} , set-points, operación). Honeywell Analytics.
13. Honeywell BW. (2018–2025). GasAlert Quattro – User Manual / Quick Reference (manuales). Honeywell Analytics. (t_{90} , operación, ajuste de alarmas).
14. Honeywell BW. (2020). BW Clip / BW Clip Real-Time – Datasheet & Operator’s Manual (monogás O_2 ; set-points fábrica 19,5/23,5 %). Honeywell Analytics.
15. Riken Keiki / RKI Instruments. (2021–2023). GX-3R y GX-3R Pro – Operating/Operator’s Manual (manuales; t_{90} “within 30 s”; máx. 3000 m; presión 70–120 kPa).
16. Riken Keiki. (2019–2022). RP-3R Pump – Operator’s Manual (bomba de succión; recomendaciones de tiempo de muestreo). RKI/Riken Keiki.

Ing. Enrique Núñez Sánchez

enrique.nun.san@gmail.com

Con datos a octubre 2025

FBSySO – Bolivia