

# Meteorología aplicada a la seguridad de las operaciones aéreas



Autor

Richard Humberto Cáceres León



# **Meteorología aplicada a la seguridad de las operaciones aéreas**



# Meteorología aplicada a la seguridad de las operaciones aéreas

**Autor**

**Richard Humberto Cáceres León**



**Escuela de Postgrados  
de la Fuerza Aérea Colombiana**  
Bogotá, D.C., Colombia (Suramérica).  
Diciembre de 2017.



## Catalogación en la publicación

### Escuela de Postgrados Fuerza Aérea Colombiana

Cáceres León, Richard Humberto

Meteorología aplicada a la seguridad de las operaciones aéreas / Richard Humberto Cáceres León. – Bogotá D.C.: Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana, 2017.

234p. : il. 24cm. – (Ciencia y Poder Aéreo; No.12)

Incluye bibliografía al final del libro.

ISBN: 978-958-59961-1-3

E-ISBN: 978-958-59961-0-6

1. Meteorología en aeronáutica – Investigaciones 2. Aviones – Factores climáticos 3. Ingeniería meteorológica. i. Cáceres León, Richard Humberto ii. Colombia. Fuerza Aérea Colombiana iii. Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana

TL558.C7F84 C33 2017

629.135 – dc23

Registro Catálogo SIBFA 87298



Archivo descargable en formato MARC en: <https://tinyurl.com/epfac87298a>

Cáceres, R. H., (2017). *Meteorología aplicada a la seguridad de las operaciones aéreas*. Primera edición. Colección Ciencia y Poder Aéreo No. 12. Bogotá, Colombia (Suramérica): Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana.

Sitio Web:<https://libros.publicacionesfac.com>

Libro de investigación  
Primera edición: Bogotá D.C. Colombia (Suramérica), Diciembre de 2017  
Colección Ciencia y Poder Aéreo No. 12  
ISBN: 978-958-59961-1-3  
E-ISBN 978-958-59961-0-6  
Número de ejemplares: 200  
Impreso y hecho en Bogotá, Colombia.

### **Consejo Editorial**

Director General: Coronel Eliot Gerardo Benavides González  
Subdirector General: Miguel Enrique Restrepo Cabrera  
Comandante Grupo Académico: Martín Fernando Zorrilla Rodríguez Comandante  
Comandante Escuadrón de Investigación: Capitán Gina Paola Garzón Méndez  
Coordinadora Editorial: María Carolina Suárez Sandoval

### **Equipo Técnico**

Gestión editorial: María Carolina Suárez Sandoval  
Revisión de texto y estilo: Marco Giraldo B., Alejandra Castellanos  
Diseño de cubierta: Alexandra Romero Cortina  
Diseño páginas interiores: Alexandra Romero Cortina  
Imagen de carátula: Fuerza Aérea Colombiana  
Impresión: Fenix Media Group Limitada

© Richard Humberto Cáceres Leon, 2017.  
© 2017, Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana  
Carrera 11 No. 102-50 Edificio ESDEGUE.  
Oficina 411. Bogotá, Colombia (Suramérica) A.A. 110111  
Teléfonos: (0571) 6378927 - (0571) 6206518 Ext. 1700, 1719, 1722  
Comentarios y sugerencias a:  
cienciaypoderaereo@gmail.com  
www.publicacionesfac.com

Está permitida la reproducción total o parcial de los capítulos que hacen parte de este libro, producto de investigación, para uso personal o con fines académicos e investigativos; siempre y cuando se haga la respectiva cita, referencia a los autores, a la Colección Ciencia y Poder Aéreo de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana. En caso de querer reproducir esta obra en cualquiera de sus formatos, deberá contar con el permiso escrito de la entidad editora.



# Contenido

<b>Presentación</b>	<b>17</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>18</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>19</b>
<b>Prólogo</b>	<b>20</b>
<b>Prefacio</b>	<b>21</b>
<b>1. Meteorología y atmósfera</b>	<b>22</b>
1.1. Breve historia de la meteorología	24
1.2. ¿Qué es la meteorología?	25
1.3. Estaciones meteorológicas	26
1.4. Observaciones meteorológicas	29
1.4.1. Observaciones aeronáuticas	29
1.4.2. Observaciones de altitud	29
1.4.3. Otras observaciones	29
1.4.4. Horas en las que se realizan las observaciones	30
1.5. La atmósfera	31
1.6. Capas de la atmósfera	32
1.7. Atmósfera tipo	34
1.8. Coordenadas geográficas	34
1.9. Husos horarios	35
<b>2. Temperatura</b>	<b>38</b>
2.1. Temperatura y calor	40
2.2. Radiación solar	
2.2.1. División de la radiación según la longitud de onda	40
2.2.2. Efectos de la atmósfera sobre la radiación solar	42
2.2.3. Efecto selectivo de la atmósfera	43
2.3. Variaciones de temperatura	44
2.3.1. Variación diurna	44



2.3.2 Variación de la temperatura con la latitud	45
2.3.3 Variación estacional	45
2.3.4 Variaciones con los tipos de superficie	46
2.3.5 Variaciones con la altura	47
2.4 Inversión térmica	48
2.5 Escalas de temperatura	51
2.5.1 Conversión de valores de temperaturas	52

---

## **3. Humedad** **53**

3.1 Definición	54
3.1.1 Humedad relativa	54
3.1.2 Punto de rocío	54
3.1.3 Saturación y condensación	55
3.2 Las nubes	55
3.2.1 Tipos de nubes según su altura	56
3.2.2 Tipos de nubes según su forma	59
3.3 Cambios de estado	59
3.4 Comportamiento de la humedad relativa vs. temperatura	60

---

## **4. El viento** **62**

4.1 Definición	64
4.2 Velocidad y dirección del viento	64
4.3 Circulación general de la atmósfera	65
4.4 Fuerzas que actúan sobre el aire en movimiento	67
4.4.1 Gradiente de presión	67
4.4.2 Fuerza de Coriolis	68
4.4.3 Fuerza centrífuga	68
4.4.3 Fuerza de fricción	69
4.5 Barlovento y sotavento	70
4.6 Medición del viento	71

---

## **5. Presión atmosférica** **72**

5.1 Definición	74
5.2 Densidad del aire	75
5.3 Variaciones en la presión atmosférica	75
5.3.1 Temperatura	75
5.3.2 Altura	76
5.3.3 Posición en la tierra	80
5.4 Principales formaciones isobáricas	81
5.5 Uso de la presión en aviación	82

---

<b>6. Altimetría</b>	<b>83</b>
6.1 Altimetro	84
6.1.1 Diseño básico del altímetro	85
6.1.2 Errores del altímetro	86
6.2 Presiones referenciales	87
6.2.1 Calaje del altímetro	88
6.2.2 Errores por cambios de presión y temperatura	90
6.3 Ejemplo práctico de altimetría	92

---

<b>7. Claves meteorológicas</b>	<b>95</b>
7.1 Interpretación clave METAR ( <i>Aerodrome Routine METeorological Report</i> )	96
7.1.1 Grupo de identificación	97
7.1.2 Grupo de viento en superficie	99
7.1.3 Grupo de visibilidad horizontal	99
7.1.4 Grupo de visibilidad vertical	100
7.1.5 Grupo de temperaturas	101
7.1.6 Grupo de ajuste altimétrico	102
7.1.7 Grupo de información suplementaria	102
7.1.8. Lectura completa del METAR	103
7.2 Interpretación clave SPECI ( <i>Aerodrome Special Meteorological Report</i> )	103
7.3 Interpretación pronóstico TREND ( <i>Trend Forecast</i> )	104
7.4 Interpretación de un TAF ( <i>Aerodrome Forecast</i> )	104
7.4.1 Grupo periodo de validez	105
7.4.2 Grupo de indicadores de cambio	105
7.4.3 Grupo de temperaturas	106
7.5 Interpretación clave AIREP ( <i>Alr REPort</i> )	107
7.5.1 Puntos en común en un AIREP obligatorio y especial	107
7.5.2 Fenómenos que deben reportarse en un AIREP obligatorio	107
7.5.3 Fenómenos que se deben reportar en un AIREP especial	108
7.5.4 Codificación y decodificación de la aeronotificación AIREP	108
7.5.5 Procedimiento para la captura de la aeronotificación AIREP en la FAC	109

---

<b>8. Peligros meteorológicos – engelamiento</b>	<b>111</b>
8.1 Altitudes favorables para el engelamiento	112
8.2 nubes que producen engelamiento	113
8.3 Factores para que se produzca engelamiento	114
8.3.1 Factores mínimos	114
8.3.2 Factores que lo intensifican	115
8.4 Clasificación del engelamiento	116

8.5 Tipos de hielo en los que se manifiesta el engelamiento	117
8.6 Engelamiento en la aeronave	118
8.6.1 Engelamiento de los bordes de ataque y cola	119
8.6.2 Formación de hielo en hélices	119
8.6.3 Engelamiento en el carburador	120
8.6.4 Formación de hielo en el tubo Pitot	120
8.6.5 Incidentes causados por engelamiento en la FAC	120

---

## **9. Peligros meteorológicos – cizalladura** **123**

9.1 Alturas favorables para el <i>Wind Shear</i>	124
9.2 Clases de <i>Wind Shear</i>	124
9.3 Situaciones que originan el <i>Wind Shear</i>	125
9.4 Mecanismo de <i>Wind Shear</i> sobre la aeronave	127
9.5 Efectos del <i>Wind Shear</i> sobre la tripulación	128
9.6 acciones de la tripulación frente al <i>Wind Shear</i>	129
9.7 Instrumentos de medición	131

---

## **10. Peligros meteorológicos – turbulencia** **133**

10.1 Turbulencia según su origen	135
10.1.1 Turbulencia mecánica	135
10.1.2 Turbulencia térmica o convectiva	137
10.1.3 Tormentas	139
10.1.4 Turbulencia por onda de montaña	140
10.1.5 Turbulencia asociada a corrientes en chorro ( <i>Jet Stream</i> )	141
10.1.6 Turbulencia en aire claro	141
10.2 Clasificación de la turbulencia	142
10.3 Áreas donde la turbulencia es más común	142
10.4 Vuelo sobre montaña	143
10.5 Caso de estudio	145

---

## **11. Peligros meteorológicos – baja visibilidad** **147**

11.1 Visibilidad	149
11.1.1 Visibilidad vertical	149
11.1.2 Visibilidad horizontal	149
11.2 Fenómenos que afectan la visibilidad	150
11.2.1 Niebla	150
11.2.2 Neblina	151
11.2.3 Calima	151
11.2.4 Humo	151
11.2.5 Precipitación	152

11.3 Factores externos que afectan la visibilidad	152
11.3.1 El viento	153
11.3.2 Cercanía a cuerpos de agua	153
11.3.3 Características de la superficie	153
11.4 Problemas para la aviación	154
11.5 Caso de estudio	158

---

## **12. Peligros meteorológicos – rayos y granizo** **160**

12.1 El rayo	162
12.2 Tipos de rayos	163
12.3 Fenómenos asociados al rayo	163
12.4 Efectos de los rayos sobre las aeronaves	164
12.5 Instrumentos de detección	165
12.6 Casos de impacto de rayo en la FAC	166
12.7 Impacto con hielo	167

---

## **13. Meteorología satelital** **170**

13.1 Satélites meteorológicos	172
13.1.1 Satélites polares o helio – sincrónicos	173
13.1.2 Satélites geoestacionarios	174
13.1.3 Características de los canales del GOES	175
13.2 Identificación del canal	177
13.2.1 Reconociendo una imagen en el canal visual	177
13.2.2 Reconociendo una imagen en el canal vapor de agua	178
13.2.3 Reconociendo una imagen en el canal infrarrojo	179
13.3 Identificación de la nube según el canal	181
13.4 Nefoanálisis	182

---

## **14. Mapas meteorológicos** **184**

14.1 Mapa de superficie o sinóptico	187
14.1.1 Baja presión	187
14.1.2 Alta presión	188
14.1.3 Vaguada o surco	188
14.1.4 Dorsal o cuña	188
14.1.5 Frentes atmosféricos	189
14.1.6 Condiciones atmosféricas reportadas en los aeródromos	190
14.2 Mapa de tiempo significativo	193
14.3 Fenómenos especiales – huracanes	196

---

## **15. Radar meteorológico** **198**

15.1 Tipos de radar	202
15.2 Partes del radar	203
15.2.1 Transmisor	204
15.2.2 Modulador	204
15.2.3 Guías de onda	205
15.2.4 Antena	206
15.2.5 Conmutador (T/R)	206
15.2.6 Receptor	206
15.2.7 Indicadores	206
15.3 Cálculo de la altitud del haz	209
15.4 Problemas asociados al cubrimiento radar	211
15.5 Volumen de muestreo en un radar	212
15.6 Reflectividad	214
15.7 Interpretación de las imágenes radar	216

---

## **Apéndice 1. Accidentes aéreos - meteorología factor contribuyente** **220**

---

## **Glosario de siglas y acrónimos** **225**

---

## **Referencias** **229**

# Lista de tablas y figuras

---

## Figuras

<b>Figura 1.</b>	Distribución de instrumentos en una Estación Meteorológica Convencional.....	27
<b>Figura 2.</b>	Estación portátil (TACMET) a la izquierda y fija (EMA) a la derecha.....	28
<b>Figura 3.</b>	Posición de radiosondas colombianos (rojo) e internacionales (azul).....	30
<b>Figura 4.</b>	Capas de la atmósfera.....	33
<b>Figura 5.</b>	Coordenadas geográficas.....	35
<b>Figura 6.</b>	Husos horarios.....	36
<b>Figura 7.</b>	Longitud de onda.....	41
<b>Figura 8.</b>	Espectro electromagnético.....	42
<b>Figura 9.</b>	Efecto selectivo de la atmósfera.....	43
<b>Figura 10.</b>	Variación horaria de la temperatura en SKPQ el 20/AGO/15.....	44

<b>Figura 11.</b>	Variación latitudinal de la temperatura.....	45
<b>Figura 12.</b>	Estaciones del año.....	46
<b>Figura 13.</b>	Tipos de superficie y albedo.....	47
<b>Figura 14.</b>	Disminución de la temperatura con la altura.....	48
<b>Figura 15.</b>	Tipos de inversión térmica.....	49
<b>Figura 16.</b>	Peso máximo al despegue sin efecto tierra.....	50
<b>Figura 17.</b>	Escalas de temperatura.....	52
<b>Figura 18.</b>	Influencia de la temperatura en la humedad del aire.....	55
<b>Figura 19.</b>	Proceso de formación de nubes.....	56
<b>Figura 20.</b>	Nubes bajas, medias y altas.....	58
<b>Figura 21.</b>	Nubes de desarrollo vertical.....	59
<b>Figura 22.</b>	Temperatura vs. humedad relativa.....	60
<b>Figura 23.</b>	Diferencias entre viento y corriente.....	64
<b>Figura 24.</b>	Puntos cardinales y rosa de vientos.....	65
<b>Figura 25.</b>	Circulación general de la atmósfera e interacción de las células de Hadley, Ferrel y Polar.....	67
<b>Figura 26.</b>	Esquema del movimiento del aire por efecto de la presión. Columnas de agua.....	67
<b>Figura 27.</b>	Influencia de la presión y fuerza de coriolis en la circulación de la atmósfera.....	68
<b>Figura 28.</b>	Velocidad de rotación de la tierra según la latitud.....	68
<b>Figura 29.</b>	Viento laminar y turbulencia inducida por el terreno.....	69
<b>Figura 30.</b>	Barlovento y sotavento.....	70
<b>Figura 31.</b>	Software AVIMET de medición del viento en la FAC.....	71
<b>Figura 32.</b>	Experimento realizado por Torricelli.....	74
<b>Figura 33.</b>	Temperatura vs. presión atmosférica horaria en Bogotá durante los tres primeros días de enero de 2010.....	76
<b>Figura 34.</b>	Comportamiento de la presión vs. altura.....	77
<b>Figura 35.</b>	Diferencias entre presión altimétrica y atmosférica en Bogotá.....	78
<b>Figura 36.</b>	Reducción de la presión eliminando la elevación del punto.....	80
<b>Figura 37.</b>	Formaciones isobáricas.....	81
<b>Figura 38.</b>	Tipos de altímetro.....	84
<b>Figura 39.</b>	Esquema simple del funcionamiento del altímetro.....	85
<b>Figura 40.</b>	Instrumentos que funcionan con la presión atmosférica.....	86
<b>Figura 41.</b>	Presiones referenciales.....	87
<b>Figura 42.</b>	Altitud y nivel de transición.....	88
<b>Figura 43.</b>	Cambios en el nivel de transición.....	89
<b>Figura 44.</b>	Cambios de presión altimétrica.....	90
<b>Figura 45.</b>	Ajuste altimétrico para evitar errores de altitud.....	91
<b>Figura 46.</b>	Regiones del mundo según el designador OACI.....	97
<b>Figura 47.</b>	Ubicación y designadores OACI de los aeródromos colombianos.....	98
<b>Figura 48.</b>	Procedimiento reporte AIREP.....	110
<b>Figura 49.</b>	Altitudes favorables de engelamiento.....	113
<b>Figura 50.</b>	Gotas sobreenfriadas.....	114

<b>Figura 51.</b>	Engelamiento acentuado por montaña .....	116
<b>Figura 52.</b>	Interacción entre el tipo de hielo y el flujo de aire. Adaptado de FAA (2015) .....	119
<b>Figura 53.</b>	Imagen infrarroja que muestra las condiciones atmosféricas del 5/SEP/10 a las 22:45 horas y la ruta de vuelo del FAC 5747.....	121
<b>Figura 54.</b>	Microburst y outburst producidos por nubes de desarrollo vertical .....	125
<b>Figura 55.</b>	Dimensiones aproximadas de los torbellinos horizontales producidos por el microburst .....	126
<b>Figura 56.</b>	Peligro de los torbellinos horizontales en la fase de aproximación de una aeronave.....	126
<b>Figura 57.</b>	Evolución del corte vertical de un microburst.....	127
<b>Figura 58.</b>	Primera regla para enfrentar un evento de <i>wind shear</i> .....	129
<b>Figura 59.</b>	Nubes de desarrollo vertical en las inmediaciones del aeródromo de CACOM-4 .....	130
<b>Figura 60.</b>	Sistema de alerta de wind shear LLWAS compuesto por varios sensores de viento en los alrededores de la pista y un radar meteorológico .....	132
<b>Figura 61.</b>	Turbulencia mecánica .....	135
<b>Figura 62.</b>	Efecto venturi en la sección más angosta vs. salida de la canalización .....	136
<b>Figura 63.</b>	Peligros causados por efecto Venturi, canalización del flujo y salida de la canalización .....	137
<b>Figura 64.</b>	Turbulencia térmica .....	138
<b>Figura 65.</b>	Corrientes diurnas y nocturnas por las laderas de las montañas .....	138
<b>Figura 66.</b>	Variación del viento en la costa por efecto de la temperatura.....	139
<b>Figura 67.</b>	La turbulencia por tormenta tiende a ser menor por el lado opuesto al yunque.....	140
<b>Figura 68.</b>	Turbulencia por onda de montaña.....	140
<b>Figura 69.</b>	Turbulencia asociada al <i>jet stream</i> y jet de bajo nivel en Colombia.....	141
<b>Figura 70.</b>	Turbulencia sobre montaña asociada a vientos fuertes y ángulos pronunciados sobre el terreno.....	144
<b>Figura 71.</b>	Imagen infrarroja del satélite GOES-13 .....	146
<b>Figura 72.</b>	Visibilidad vertical estimada.....	149
<b>Figura 73.</b>	Visibilidad horizontal y oblicua disminuida por la presencia de hidrometeoros y litometeoros .....	150
<b>Figura 74.</b>	Baja visibilidad por inversión térmica y contaminantes .....	152
<b>Figura 75.</b>	Baja visibilidad por flujo del viento y disminución diaria de la temperatura.....	153
<b>Figura 76.</b>	Niebla por humedad y tipo de superficie.....	154
<b>Figura 77.</b>	Accidente aéreo por baja visibilidad en el aterrizaje .....	156
<b>Figura 78.</b>	Accidente aéreo por volar debajo de la MEA con poca visibilidad .....	156
<b>Figura 79.</b>	Imagen satelital y radar de un evento de baja visibilidad en Apiay. Información meteorológica tomada del SIMFAC (s.f.).....	159
<b>Figura 80.</b>	Promedio anual de rayos medido por el sensor LIS, las áreas que no son visualizadas por el instrumento son representados en color blanco.....	163
<b>Figura 81.</b>	Impacto con rayo en aeronaves .....	165
<b>Figura 82.</b>	Representación de la frecuencia de rayos sobre una imagen satelital en el canal infrarrojo .....	166
<b>Figura 83.</b>	FAC 3106 impactado por rayo el 20/ABR/12.....	167
<b>Figura 84.</b>	Impacto con hielo en aeronaves .....	168
<b>Figura 85.</b>	Imagen infrarroja con la ruta de la aeronave y daños causados por impacto con hielo .....	169

<b>Figura 86.</b>	Órbita de los satélites meteorológicos.....	172
<b>Figura 87.</b>	Órbita de los satélites polares .....	173
<b>Figura 88.</b>	Problemas que se presentan en área de barrido de los satélites polares.....	174
<b>Figura 89.</b>	Área de cubrimiento del GOES-13.....	175
<b>Figura 90.</b>	Imagen visual GOES-13 .....	178
<b>Figura 91.</b>	Imagen vapor de agua GOES-13.....	179
<b>Figura 92.</b>	Imagen infrarroja GOES-13 .....	180
<b>Figura 93.</b>	Nefoanálisis sobre el territorio colombiano .....	182
<b>Figura 94.</b>	Rotación de los sistemas barométricos .....	187
<b>Figura 95.</b>	Eje de una vaguada .....	188
<b>Figura 96.</b>	Eje de una dorsal .....	188
<b>Figura 97.</b>	Distintos tipo de frentes atmosféricos.....	189
<b>Figura 98.</b>	Datos de una estación en superficie.....	190
<b>Figura 99.</b>	Representación del viento en el hemisferio norte .....	191
<b>Figura 100.</b>	Cálculo de intensidad del viento .....	192
<b>Figura 101.</b>	Mapa de análisis de superficie del 28 de noviembre de 2017 a las 18 UTC.....	192
<b>Figura 102.</b>	Mapa de tiempo significativo valido desde las 12 a las 18 UTC del 27 de septiembre de 2011.....	195
<b>Figura 103.</b>	Tormenta tropical Ophelia .....	197
<b>Figura 104.</b>	Ubicación de los radares meteorológicos en Colombia.....	200
<b>Figura 105.</b>	Distribución lobular de la energía emitida por el radar.....	202
<b>Figura 106.</b>	Radar de doble polarización .....	203
<b>Figura 107.</b>	Esquema básico de un radar.....	204
<b>Figura 108.</b>	Alcance máximo de un radar y PRF.....	205
<b>Figura 109.</b>	Diferentes tipos de PPI del radar de Corozal .....	207
<b>Figura 110.</b>	Operación de un radar usando el indicador RHI.....	208
<b>Figura 111.</b>	RHI de una tormenta detectada por el radar de Corozal .....	208
<b>Figura 112.</b>	Altura del haz teórico y práctico del radar de El Tablazo .....	210
<b>Figura 113.</b>	Correcta distribución de los ángulos radar en los radares colombianos.....	210
<b>Figura 114.</b>	Zonas invisibles por cercanía al radar y bloqueo orográfico .....	211
<b>Figura 115.</b>	Bloque orográfico radar de San Andrés .....	211
<b>Figura 116.</b>	PPI captados por el radar de San Andrés el 23/SEP/15 a las 17:05 Z. ....	212
<b>Figura 117.</b>	Longitud y ancho del haz de un radar.....	214
<b>Figura 118.</b>	Identificación de tipo de nube y características usando imágenes satelitales y radar.....	217
<b>Figura 119.</b>	Porcentaje de afectación a las aeronaves FAC según el tipo de peligro meteorológico en el periodo 1985 – 2013.....	224

## Tablas

<b>Tabla 1.</b>	Instrumentos comunes en una estación meteorológica convencional .....	26
<b>Tabla 2.</b>	Composición de la atmósfera .....	31
<b>Tabla 3.</b>	Clasificación de onda corta y larga.....	41



<b>Tabla 4.</b>	Discriminación de los diferentes tipo de peso en una configuración operacional típica para un helicóptero Huey UH-1H.....	49
<b>Tabla 5.</b>	Fórmulas de conversión de la temperatura.....	52
<b>Tabla 6.</b>	Clasificación del tipo de nubes según su altura.....	57
<b>Tabla 7.</b>	Cambios de estado del agua.....	60
<b>Tabla 8.</b>	Velocidad zonal según la latitud.....	69
<b>Tabla 9.</b>	Designadores OACI de los aeródromos colombianos.....	97
<b>Tabla 10.</b>	Codificación de fenómenos meteorológicos.....	100
<b>Tabla 11.</b>	Codificación de cantidad de nubes.....	101
<b>Tabla 12.</b>	Altitud mínima del sector unidades FAC.....	101
<b>Tabla 13.</b>	Codificación AIREP de fenómenos meteorológicos.....	108
<b>Tabla 14.</b>	Temperatura promedio según la intensidad de engelamiento y tipo de hielo.....	118
<b>Tabla 15.</b>	Clasificación de la turbulencia.....	142
<b>Tabla 16.</b>	Áreas donde es más común cierto tipo de turbulencia.....	142
<b>Tabla 17.</b>	Criterios de clasificación para meteoros que afectan la visibilidad.....	152
<b>Tabla 18.</b>	Hora inicio niebla en el aeródromo de Rionegro.....	155
<b>Tabla 19.</b>	Características actuales de los canales del satélite GOES.....	176
<b>Tabla 20.</b>	Características del GOES-R.....	176
<b>Tabla 21.</b>	Significado del brillo en una nube según el canal.....	181
<b>Tabla 22.</b>	Detección de nubes según el canal.....	181
<b>Tabla 23.</b>	Capacidades del canal en la detección de tipo de nubes.....	182
<b>Tabla 24.</b>	Tipo y altura de nubes según nefoanálisis.....	183
<b>Tabla 25.</b>	Isolíneas más comunes.....	186
<b>Tabla 26.</b>	Fenómenos reportados en mapas de tiempo presente.....	190
<b>Tabla 27.</b>	Representación de la cobertura de cielo, en octas.....	191
<b>Tabla 28.</b>	Fenómenos reportados en mapas de tiempo significativo.....	194
<b>Tabla 29.</b>	Capacidades del canal en la detección de tipo de nubes.....	194
<b>Tabla 30.</b>	Proceso de formación del huracán (mph).....	196
<b>Tabla 31.</b>	Categorías de huracán según Saffir-Simpson (mph).....	197
<b>Tabla 32.</b>	Especificaciones técnicas de los radares colombianos.....	201
<b>Tabla 33.</b>	Bandas típicas de los radares meteorológicos.....	202
<b>Tabla 34.</b>	Volumen de muestreo respecto a la distancia radial.....	213
<b>Tabla 35.</b>	Sector a.....	216
<b>Tabla 36.</b>	Sector b.....	217
<b>Tabla 37.</b>	Sector c.....	218
<b>Tabla 38.</b>	Sector d.....	218
<b>Tabla 39.</b>	Sector e.....	218
<b>Tabla 40.</b>	Sector f.....	219
<b>Tabla 41.</b>	Sector g.....	219

# Presentación



Andrés Oppenheimer afirma en su libro "Crear o Morir" que en la actualidad y para los países, las reales posibilidades de desarrollo y futuro sostenible se encuentran en su sistema de educación con un núcleo científico y de innovación. Es por esta razón que la Fuerza Aérea Colombiana, a través de uno de sus activos estratégicos como lo es la Escuela de Postgrados (EPFAC), tiene como prioridad gestionar y apropiar el conocimiento en el marco del sector aeronáutico y espacial colombiano.

De ahí la importancia de este gran trabajo y el aporte realizado por el señor Mayor Richard Humberto Cáceres León, oficial activo de nuestra Fuerza y quien se desempeñó durante más de 5 años como especialista en pronóstico del tiempo dentro de la Subdirección de Meteorología de la FAC, y acuñó esta publicación correspondiente al No. 12 de nuestra Colección Ciencia y Poder Aéreo con el título: *Meteorología Aplicada a la Seguridad de las Operaciones Aéreas*, una iniciativa disruptiva y operacional al considerar la apropiación del conocimiento; que tendrá sin lugar a dudas, un impacto positivo en el contexto externo a la FAC, entiéndase el sector aeronáutico y espacial colombiano, así como en el entorno operacional de la Fuerza, a partir de su aplicación en un área fundamental en la preparación y desarrollo de las operaciones aéreas.

Todo lo anterior, consecuencia de constantes observaciones y experiencias capitalizadas por la FAC y por el autor de este libro, donde buenas prácticas y espíritu innovador, han permitido avanzar, sobrepasar retos y dificultades para ser aplicadas por la comunidad aeronáutica en el planeamiento y preparación de las distintas misiones de vuelo en las cuales interactúan controladores e informadores de vuelo, pilotos y navegantes, así como los comandantes en las distintas perspectivas de la cadena de mando, todo a partir de los elementos conceptuales y los casos de estudio presentados que se contrastan con las especificidades de una operación de una Fuerza Aérea que ha podido sumar más de 90 mil horas de vuelo en un año calendario, en medio de una geografía de altas montañas, contrastada con selvas y alta humedad, hasta el desierto en la alta Guajira colombiana. Lo anterior, bajo la premisa de la gestión de la seguridad operacional, porque "Así se va a las Alturas".

CORONEL ELIOT GERARDO BENAVIDEZ GONZÁLEZ  
Director Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana



# Agradecimientos

---

18

A la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) por confiar en mí y darme la oportunidad de estudiar Meteorología en la Universidad Nacional de Colombia, cuando ostentaba el grado de Teniente y comenzar estudios de doctorado en Meteorología en la Universidad de Barcelona en el grado de Mayor, al grupo que conforma la Subdirección de Meteorología de la FAC por sus enseñanzas y quienes con su trabajo constante apoyan las operaciones aéreas salvaguardando la vida de nuestras tripulaciones.

A la Inspección General de la FAC por darme acceso a la información y permitirme ilustrar con casos reales como la meteorología afecta nuestras operaciones aéreas. A la Escuela de Posgrados de la FAC por creer en este proyecto, dándome la oportunidad de plasmar mi experiencia al servicio de la Fuerza Aérea Colombiana.

Al Doctor Bernat Codina, profesor de la Universidad de Barcelona y al Señor Mayor Jorge Jiménez, doctorando de la Penn State University, quienes con sus conocimientos y experiencias han revisado y mejorado toda la información expuesta en este documento.

A mis profesores de la Universidad Nacional, Jorge Zea (Q.E.P.D) quien siempre me habló con sabiduría, Gerardo Montoya, Emel Vega, Nancy Villegas, Francisco Boshell, Gloria León y, en especial, al profesor Daniel Pabón, quien más que mi director de tesis de maestría, lo he considerado mi amigo y colega.

A mi madre Yasmine León quien me dio la vida, me vio crecer, me llenó de fuerzas y me enseñó a nunca desfallecer en mis propósitos, a mi padre Gustavo, a mi hermano Gustavo Adolfo, a mis abuelos y tíos maternos, quienes con su amor y comprensión incondicional me han acompañado a lo largo de todo mi camino.

A Rocío Villamizar, mi esposa y diosa inspiradora, quien con su alegría, fortaleza y valentía me ha permitido ser parte de su vida y camina junto a mí en el sendero de la felicidad. Su amor incondicional ha sido el motor de mis días, mis proyectos y mis ilusiones.

A María Regina López García, a Ricardo Lozano (Q.E.P.D) y a su esposa Sandra Pachón, quienes sin conocerme me albergaron en su hogar, me trataron como su hijo, me brindaron amor y me tendieron la mano, cuando más lo necesitaba.

A Diana Vargas y toda su familia, quienes fueron una luz durante largas noches de estudio y me brindaron todo su cariño y respeto, dándome voces de aliento y llenándome de ánimo para seguir adelante.

A la Sra. Mary Alfaro y a sus hijas, quienes me dieron su amistad y me recibieron en su hogar; de ellas siempre recibí cariño, comprensión y solidaridad.

A mis grandes amigos Juan Gabriel Medina y Yecenia Davila Riaño, sólo en ellos he confiado mi vida y mis experiencias, son dignos de todo mi respeto, cariño y admiración.

A los tripulantes de vuelo que con su experiencia enriquecieron muchos de los temas aquí expuestos, ellos son: Mayor Andrés Maya, Mayor Julián Núñez, Mayor Guillermo Poveda y Mayor Claudio Rojas.

Para ellos y para muchas otras personas que han sido especiales en mi vida, para los meteorólogos colombianos, para los aviadores que sobrevuelan el trópico, para todos aquellos que han hecho aportes positivos en mi formación académica y personal, mil y mil gracias, sin su ayuda este proyecto nunca hubiese sido posible.



# Dedicatoria

---

Esta obra está dedicada a mi esposa ROCÍO, su nombre siempre ha significado mucho para mí

Rubí de mirada profunda y ojos soñadores, rubí de alegría, de colores

Oda de la belleza eterna que quema, que mata y que enamora

Cúspide de todos los besos donde no hay suspiro alguno que razona

Idilio que me ahoga con sus besos, sus abrazos y su aroma

Obra divina de la vida, luz de mis sueños y mis horas.



# Prólogo

---

20

En la historia de la Fuerza Aérea Colombiana el desarrollo de la Meteorología viene escribiendo apartes desde el año 1972, capítulos a través de los cuales se evidenció un vertiginoso avance en la utilización de esa ciencia con fines misionales, particularmente entre los años 2001 y 2006 periodo en el que se concibió e implementó el Sistema Meteorológico de la FAC – SIMFAC, con su posterior fortalecimiento entre 2007 y hasta la fecha. El significativo avance es una respuesta a las exigencias operacionales que cotidianamente enfrentan las tripulaciones de la FAC, la Fuerza Pública y la Aviación de Estado, y a la necesidad de continuar garantizando operaciones exitosas y más eficientes en ambientes operacionales más complejos, mientras se incrementa la seguridad operacional.

En este marco, Richard Cáceres León un hombre escéptico motivado por la búsqueda del saber, fue incorporado al proyecto SIMFAC en el año 2008, con la misión de gestionar el conocimiento para garantizar el correcto entendimiento y utilización de la información producida por el SIMFAC y realimentar el proceso induciendo la mejora continua; el autor, desplegó diversas iniciativas entre ellas la formulación de cursos, la creación de valioso material pedagógico y acciones de mejora; su capacidad para formular preguntas de investigación y resolverlas metódicamente se pone de manifiesto en esta obra iniciada en el año 2011 que hoy con persistencia, ha alcanzado el nivel de madurez deseado para su publicación.

A lo largo de su carrera Richard ha tenido la oportunidad de participar activamente en los diversos procesos que conlleva la generación de información meteorológica, desde la captura misma del dato hasta los complejos procesos de modelación numérica, en cada paso ha aportado con su visión constructiva y el deseo de aterrizar los conceptos a la práctica cotidiana; es por esto que el lector disfrutará el contenido del libro y apropiará el conocimiento expuesto encontrando empatía en las vivencias descritas.

La obra constituye un aporte significativo a la meteorología aeronáutica, al explicar conceptos básicos sobre los que se construyen los procesos atmosféricos que explican la formación y el desarrollo de los fenómenos adversos con los cuales convivimos los aviadores en el trópico; adicionalmente, explota las valiosas experiencias operacionales apropiadas por la FAC para facilitar el entendimiento de estos peligros, con la visión altruista de incrementar la seguridad operacional permitiendo a los aviadores el desarrollo del vuelo en ambientes más conocidos y con riesgos mejor gestionados.

LUIS RAÚL SANCHÉZ VARGAS  
My(r) Subdirector Meteorología FAC (2008– 2015)



# Prefacio

Este libro es la materialización de un sueño, de un propósito, de una idea nacida de la necesidad, como meteorólogo, de poner a disposición de los aviadores, controladores y personal que trabaja en la aviación toda mi experiencia y conocimiento sobre la meteorología aeronáutica aplicada a la seguridad de las operaciones aéreas.

Se pretenden tres objetivos principales: el primero, utilizar la meteorología desde el punto de vista operativo, dando a conocer información meteorológica útil que ayude al piloto a reconocer fenómenos meteorológicos adversos; el segundo es utilizar conceptos sencillos, parámetros y realidades propias del trópico, que brinden al aviador el conocimiento suficiente para afectar su buen juicio al momento de decidir si continúa su vuelo y si realiza o no la misión, aceptando el riesgo meteorológico que podría llegar a inducirlo en un accidente aéreo; y tercero, facilitar la labor de los servicios meteorológicos aeronáuticos poniendo a su disposición el material de consulta necesario para asesorar a las tripulaciones durante el planeamiento y conducción de las operaciones aéreas.

Los primeros cinco capítulos desarrollan temas de meteorología aeronáutica básica, con los conceptos que el personal de meteorología aeronáutica debería familiarizarse para comprender los procesos meteorológicos y su influencia en las operaciones aéreas. Los capítulos 6 y 7 desarrollan altimetría y claves meteorológicas de una forma práctica y sencilla, los capítulos del 8 al 12 tratan el tema de los peligros meteorológicos tropicales ejemplificados en el estudio de casos reales ocurridos al interior de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), y los capítulos 13, 14 y 15 facilitan la interpretación de imágenes meteorológicas satelitales, mapas meteorológicos y radares meteorológicos.



# Capítulo 1

## Meteorología y atmósfera

---

- 1.1. Breve historia de la meteorología
- 1.2. ¿Qué es la meteorología?
- 1.3. Estaciones meteorológicas
- 1.4. Observaciones meteorológicas
- 1.5. La atmósfera
- 1.6. Capas de la atmósfera
- 1.7. Atmósfera tipo
- 1.8. Coordenadas geográficas
- 1.9. Husos horarios



# 1.1. Breve historia de la meteorología

---

En época remotas, la humanidad empezó a interesarse en conocer las condiciones atmosféricas para solucionar problemas relacionados con temporadas de lluvia, sequía, calor, frío, las cuales influían en actividades como la caza y la siembra de cultivos. Con los años, la observación y a fuerza de permanecer siempre en el mismo sitio, las personas fueron desarrollando una especie de intuición para conocer las condiciones atmosféricas y, por ende, una habilidad rudimentaria para predecir el estado del tiempo.

A la necesidad de comprender el comportamiento de la atmósfera y sus efectos sobre la humanidad se sumó una perspectiva científica, la cual se inició con el estudio de los astros, el movimiento de los cuerpos celestes y la relación de las estaciones al movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Las observaciones meteorológicas instrumentales comenzaron en el siglo XVII, cuando Galileo Galilei en 1593 inventó un instrumento rudimentario que con el tiempo se convertiría en el termómetro, y su discípulo Torricelli inventó el barómetro (1643), sin saber que éste sería uno de los instrumentos más útiles en el mundo aeronáutico.

Estos primeros avances fueron aprovechados por los oficiales de marina, quienes utilizaron los conocimientos en meteorología para la navegación marítima de la época. Durante la última mitad del siglo XIX, en muchos países aparecieron servicios meteorológicos organizados que difundían información y predicción del tiempo con objetivos más amplios que las necesidades de la navegación marítima.

Al nacer la aviación en 1903 con los hermanos Wright, esos pequeños y débiles aviones enfrentaban toda clase de peligros, porque no se contaba con motores a reacción, materiales adecuados, instrumentación y conocimientos certeros sobre aerodinámica y condiciones atmosféricas en altura.

La segunda mitad del siglo XX trajo consigo los satélites y, con ellos, la posibilidad de generar imágenes meteorológicas que brindaran mejor información sobre el estado del tiempo. También se afianzaron técnicas de predicción del tiempo mediante la implementación de modelos matemáticos resueltos por los ordenadores modernos.

En Colombia, la meteorología nació formalmente en 1969 con el Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología (SCMH), el cual incorporó los instrumentos y datos que se habían adquirido hasta la época. En 1978, cambió su nombre a Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT) y, finalmente, en 1995 migra al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

En la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), la meteorología nació en 1972 con la adquisición de tres estaciones meteorológicas para los Comandos Aéreos de Combate CACOM-1, 2



y 6. En 1998, se creó la sección de meteorología aeronáutica en el Comando de la Fuerza Aérea (COFAC), y para 2001 se instaló el primer receptor de imágenes satelitales. En 2004, se instauró la Subdirección de Meteorología después de capacitar seis (6) oficiales como Magister en Meteorología en la Universidad Nacional de Colombia. En 2005, se implementó la medición de variables meteorológicas en altura, y en 2006 se hizo lo propio con la predicción meteorológica mediante el uso del modelo meteorológico *Weather Research and Forecasting* (WRF) en la versión 2.1.

Pero fue hasta 2007 cuando se visualizó la meteorología como un sistema, compuesto por personal capacitado, equipos y una plataforma digital conocida como el Sistema de Información Meteorológico de la FAC (SIMFAC). En 2011 se cambiaron las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs) de CACOM-1, 2, 4, 6, 7, del grupo Aéreo del Oriente (GAORI) y del Comando Aéreo de Mantenimiento (CAMAN); de igual manera, ese año se adquirió la estación meteorológica portátil *Tactical Meteorological Observation System* (TACMET). En 2012, se capturaron las primeras imágenes satelitales de índole polar y se instaló en COFAC una estación de trabajo con el software *Interactive Radar Information System* (IRIS/Analysis), con capacidad de capturar y analizar información proveniente de los radares meteorológicos colombianos, adquiridos por la Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil (UAEAC). Las capacidades de este software para analizar datos radar pueden encontrarse en el manual de usuario de Vaisala (2017).

Para 2016, el servicio meteorológico de la FAC ya estaba en la capacidad de analizar, diagnosticar y pronosticar las condiciones meteorológicas en cualquier punto del territorio colombiano hasta 72 horas en el futuro. Además, realizaba seguimiento a los fenómenos atmosféricos presentes en Colombia, asesoraba a las tripulaciones en el planeamiento de vuelos nacionales e internacionales, investigaba accidentes aéreos donde la meteorología era considerada un factor contribuyente y generaba productos meteorológicos aplicados en pro del desarrollo seguro de las operaciones aéreas.

## 1.2. ¿Qué es la meteorología?

Del griego *meteoros* (alto) y *logos* (tratado o estudio), la meteorología es el estudio de los fenómenos atmosféricos y de los mecanismos que producen el tiempo. La Real Academia Española (RAE, 2014) la define como la “ciencia que trata de la atmósfera y de los meteoros”.

La meteorología ha sido utilizada con diferentes fines, cada uno de los cuales constituye una rama de la misma; por ejemplo, la meteorología física, dinámica, experimental, aplicada, sinóptica, agrícola, marítima y aeronáutica. Esta última es de gran interés para nosotros, pues estudia el efecto que los fenómenos meteorológicos tienen sobre las aeronaves y todo lo concerniente a la aeronavegación.

Antes de continuar, es necesario comprender las diferencias entre tiempo y clima. Por un lado, el **tiempo** es el estado de la atmósfera en un momento y punto específico, el cual cambia constantemente influenciado por los diversos parámetros meteorológicos (presión, temperatura, humedad). Por su parte, el **clima** hace referencia a las condiciones atmosféricas predominantes de una región o zona determinada, considerando un largo



período de tiempo (30 años). El clima de una localidad no cambia con facilidad y está determinado por su latitud, orografía y posición geográfica relativa respecto a los continentes y océanos, etc.

En su mayoría, las operaciones aéreas son afectadas por las condiciones del tiempo y no por las condiciones del clima, toda vez que se desarrollan en un momento y punto específico en el cual las condiciones atmosféricas pueden afectar el cumplimiento de la misión. Nótese el correcto uso de los dos términos en el siguiente ejemplo:

26

*Mi Capitán, el punto de interés se encuentra rodeado por amplias montañas. La visibilidad tiende a ser mínima por la elevada concentración de humedad y espesa vegetación. Levamos realizando operaciones militares ahí por más de 30 años y siempre nos hemos visto expuestos al mal **clima**, acompañado de fuertes vientos y mucha turbulencia. De todas maneras, al momento de realizar la entrega de alimentos y enseres, le recomendamos llamar directamente a la tropa que está ubicada en ese sector; ellos tienen medios de comunicación y le darán directamente las indicaciones reales del **tiempo**.*

Para que la meteorología pueda utilizarse de manera más amplia se requiere realizar observaciones en lugares establecidos, donde es necesario contar con datos meteorológicos para una o varias finalidades, ya sea en tiempo pasado, presente, o ambos. Estos lugares deben reunir determinadas condiciones técnicas normalizadas, a los cuales se les denomina estaciones meteorológicas convencionales.

## 1.3. Estaciones meteorológicas

Poseen instrumentos meteorológicos divididos en dos grandes grupos: los que terminan en metro (termómetro), y los que terminan en grafo (termógrafo). Los primeros requieren de un observador para que tome la medida en el preciso instante en el cual el sensor toma el dato, mientras que los segundos registran continuamente sus resultados en papel, los cuales pueden ser consultados después por el observador. Una estación meteorológica convencional cuenta, por lo general, con los elementos de la tabla 1.

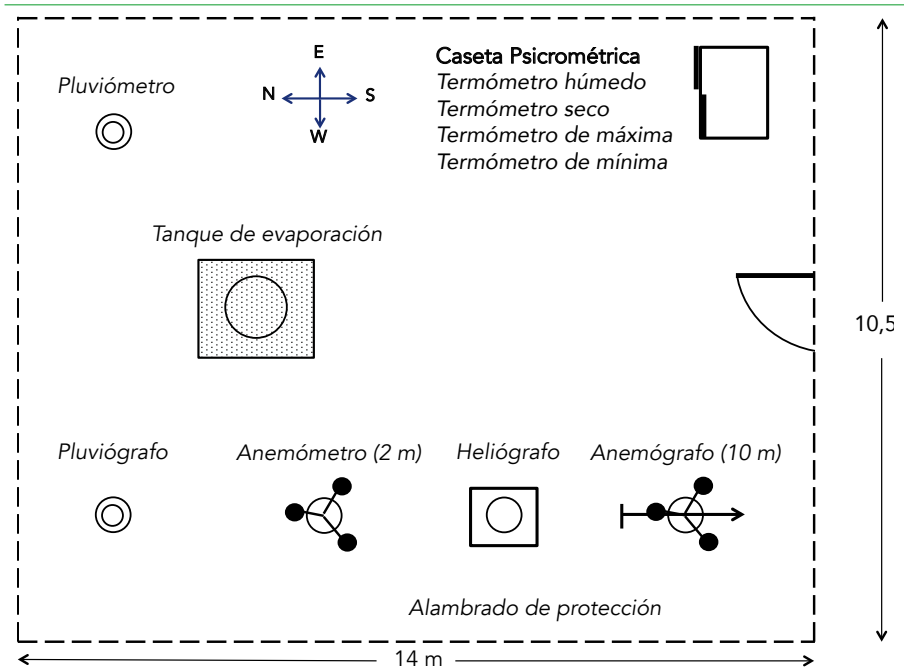
**Tabla 1.** Instrumentos comunes en una estación meteorológica convencional.

Instrumento	Variable a medir
Termómetro de máximas	Temperatura máxima registrada en el día
Termómetro de mínimas	Temperatura mínima registrada en el día
Termómetro húmedo	Temperatura húmeda
Termómetro seco	Temperatura normal del aire
Pluviómetro y pluviógrafo	Precipitación acumulada
Tanque de evaporación	Evaporación
Heliógrafo	Horas al día con brillo solar
Anemómetro y anemógrafo	Velocidad y dirección del viento

Fuente: elaboración propia.



En los aeródromos, las Estaciones Meteorológicas Convencionales (figura 1) están siendo reemplazadas por Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs), las cuales transmiten la información en tiempo real a un software especializado. Este software permite realizar todo tipo de cálculos y algoritmos que facilitan el rápido flujo de información y brindan datos adicionales a las tripulaciones como altura de las nubes, visibilidad horizontal, visibilidad vertical, tiempo presente y presión altimétrica.



**Figura 1.** Distribución de instrumentos en una Estación Meteorológica Convencional.

**Fuente:** elaboración propia.

Para el 2016, la FAC contaba con 7 EMAs (figura 2, derecha) compuestas cada una de ellas por:

- Dos sensores de velocidad del viento (ultrasónico)
- Dos sensores de dirección del viento (ultrasónico)
- Dos paneles solares
- Dos mástiles frangibles de 10 m (en fibra de vidrio)
- Un sensor de temperatura
- Un sensor de humedad
- Un sensor de presión
- Un sensor precipitación
- Tres estaciones de trabajo

- Dos servidores y sistema de visualización
- Dos cámaras tipo WEB (con infrarrojo)
- Un software especializado tipo *Automated Weather Observing System (AWOS)*
- Un sensor descargas eléctricas
- Un RVR (Runway Visual Range)
- Un ceilómetro
- Un ATIS (Automatic Terminal Information Service)
- Un sensor descargas eléctricas

Sólo en CACOM-6

También disponía de un sistema portátil tipo TACMET (figura 2, izquierda) con un sensor de dirección y velocidad del viento de cazoletas, un panel solar, un mástil de 10 m, un sensor de humedad, presión, temperatura, un ceilómetro, un sensor de tiempo presente y un computador robusto con el software AWOS como parte del AVIMET Weather Display, especializado en el análisis estadístico y visualización de datos meteorológicos. Las características de análisis estadístico y visualización de datos meteorológicos de este software pueden ser consultados en el manual de usuario Vaisala (2013).



Figura 2. Estación portátil (TACMET) a la izquierda y fija (EMA) a la derecha.



# 1.4. Observaciones meteorológicas

La observación meteorológica consiste en la medición de todos los elementos meteorológicos que, en su conjunto, representan las condiciones del estado de la atmósfera en un momento dado.

Las observaciones realizadas metodológicamente y en forma sistemática, uniforme, ininterrumpida y a horas establecidas, permiten conocer las características y variaciones de los elementos atmosféricos, las cuales constituyen los datos básicos que utilizan los servicios meteorológicos para analizar información pasada y realizar análisis de datos en tiempo cuasi real.

## 1.4.1 Observaciones aeronáuticas

Se trata de observaciones especiales que se realizan en las estaciones meteorológicas instaladas en los aeródromos. Estas observaciones se comunican a las aeronaves en vuelo en las cuales el piloto y los servicios meteorológicos necesitan conocer las condiciones atmosféricas propias de su aeródromo de salida o destino. Las variables más comunes reportadas son: temperatura, fenómenos predominantes, dirección y velocidad del viento, visibilidad horizontal, altura de las nubes, reglaje altimétrico, entre otros, y los cuales se cifran en claves meteorológicas, como las relacionadas en el capítulo 7.

## 1.4.2 Observaciones de altitud

Estas mediciones se hacen a través de radiosondas, las cuales son elevadas al espacio por medio de globos inflados con helio o hidrógeno y toman datos de presión atmosférica, temperatura, humedad y dirección e intensidad del viento a medida que van ascendiendo desde superficie hasta altitudes aproximadas de 30 km.

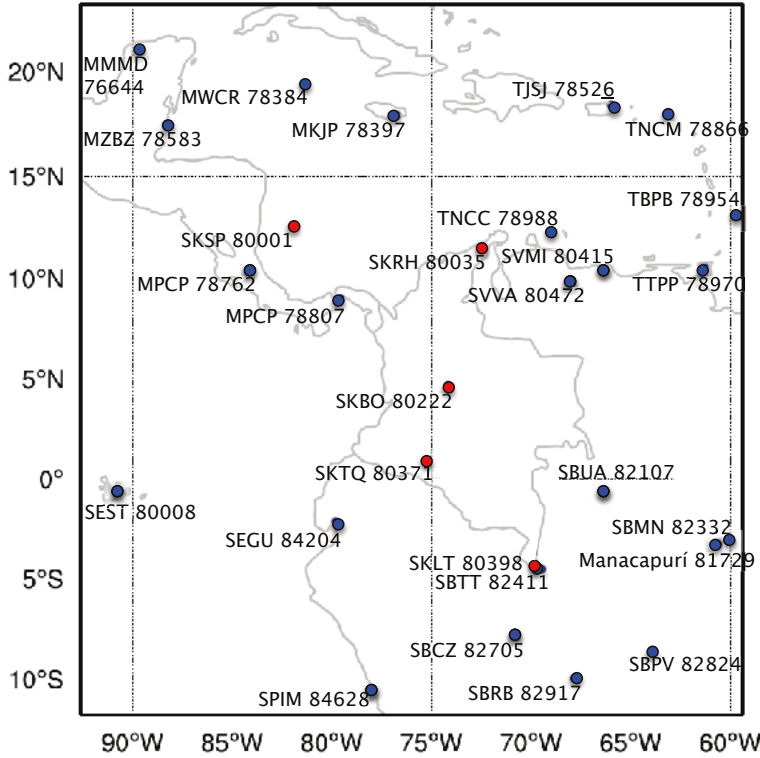
Aunque en la mayor parte del mundo se realizan dos lanzamientos diarios (12:00 y 00:00 UTC<sup>1</sup>), en Colombia se hace una sola vez por día (12:00 UTC). La FAC lo hace desde CACOM-6 con código de la Organización Meteorológica Mundial (WMO) 80371 y la Aeronáutica Civil en Bogotá (80 222), San Andrés (80 001), y de forma intermitente, en Riohacha (80 035) y Leticia (80 398). La figura 3 representa en color rojo la posición de los radiosondeos colombianos y en azul los puntos de radiosondeo más cercanos al país. ntos de radiosondeo más cercanos al país.

## 1.4.3 Otras observaciones

Si bien se realizan observaciones a partir de aeronaves en vuelo, también se llevan a cabo diversos tipos de observaciones especiales tales como medición de la radiación, ozono, contaminación atmosférica, hidrológicas, temperatura a varias profundidades de la tierra y humedad del aire a diversos niveles.

<sup>1</sup> Siglas para referirse al Universal Time Coordinated, un estándar de tiempo internacional.





**Figura 3.** Posición de radiosondas colombianas (rojo) e internacionales (azul).  
**Fuente:** elaboración propia.

### 1.4.4 Horas en las que se realizan las observaciones

La hora de observación depende del tipo, finalidad y uso de cada observación. Es importante que las observaciones sean sincrónicas y continuas durante varios años para que puedan utilizarse en cualquier estudio o investigación. Para determinado tipo de observaciones, en especial las sinópticas, la WMO ha establecido horas fijas, en tiempo universal coordinado (UTC).

Horas sinópticas principales	Horas sinópticas intermedias
00:00 – 06:00 – 12:00 – 18:00 UTC	03:00 – 09:00 – 15:00 – 21:00 UTC

Las observaciones aeronáuticas se realizan en forma horaria por parte de los controladores aéreos, y en vuelo en cualquier momento por parte del piloto. Como se detallará en el capítulo 13, las observaciones aeronáuticas más importantes son las que se realizan vía satélite utilizando teledetección. Estas observaciones tienen la ventaja de cubrir territorios muy amplios, con una frecuencia de dos a cuatro imágenes por hora para el caso de los satélites geostacionarios.



## 1.5. La atmósfera

La atmósfera es el conjunto de gases, aerosoles y nubes que envuelve a la Tierra. A nivel del mar y según lo indicado en la tabla 2, el aire seco está compuesto principalmente de nitrógeno (78 %), oxígeno (21 %) y otros gases (1 %). El detalle de la distribución de gases en la atmósfera puede ser consultado en Wallace & Hobbs (2006).

31

**Tabla 2.** Composición de la atmósfera.

Gas	Porcentaje
Nitrógeno	78,08 %
Oxígeno	20,95 %
Argón	0,93 %
Dióxido de Carbono	0,038 %
Neón	0,0018 %
Helio	0,0005 %
Metano	0,0001 %
Criptón	0,0001 %
Hidrógeno	0,00005 %
Óxido nitroso	0,00003 %
Ozono	0,000001 %

**Fuente:** Modificado de Wallace & Hobbs (2006).

La atmósfera contiene, además, una proporción variable de vapor de agua, nubes (agua condensada) y hielo. El vapor de agua absorbe la radiación de onda larga emitida por la Tierra, impidiendo que la Tierra se enfríe por la noche hasta unos  $-20^{\circ}\text{C}$ , como ocurriría en una atmósfera completamente seca.

A los 25 km de altura, existe en la atmósfera una proporción variable y pequeña de ozono que, gracias a su enorme capacidad de absorción de rayos ultravioleta, protege a los seres vivos del impacto negativo de estos rayos.





## 1.6. Las capas de la atmósfera

---

32

La división de la atmósfera puede plantearse desde dos criterios principales: la modificación que se produce en la composición química del aire (homósfera y heterósfera), y la variación de la temperatura a medida que aumenta la altura. Siguiendo este último criterio y como puede ser observado en la figura 4, la atmósfera puede ser dividida en las siguientes capas:

**Tropósfera.** Por su cercanía a la superficie de la Tierra se considera la primera capa de la atmósfera. En ella, la temperatura disminuye con la altura hasta unos  $-56\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En el trópico puede alcanzar  $\sim 20\text{ km}$  de espesor y va decreciendo hasta unos  $\sim 9\text{ km}$  en los polos, manteniendo así una altura promedio de  $12\text{ km}$ . En esta capa ocurren la mayoría de los fenómenos meteorológicos, así que las aeronaves que la sobrepasen estarán mucho más a salvo de las malas condiciones del tiempo.

**Estratósfera.** En esta capa, que alcanza unos  $50\text{ km}$  de altura, la temperatura aumenta con la altura. La interacción, choque y absorción de los rayos ultravioleta con las altas concentraciones de ozono, generan un calentamiento y aumento de la temperatura hasta pocos grados bajo cero. Esta segunda capa contiene la mayor concentración de ozono a  $25\text{ km}$  de altura.

**Mesósfera.** Esta capa llega hasta los  $80\text{ km}$  de altura y en ella la temperatura vuelve a descender con la altura hasta los  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Termósfera.** Se extiende de los  $80$  a  $600\text{ km}$  de altura. En ella, los gases se encuentran en estado de disgregación atómica; las partículas con carga eléctrica abundan y al entrar en contacto con los rayos solares, causan un nuevo aumento de temperatura que pueden superar los  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Exósfera.** En esta capa la temperatura disminuye nuevamente con la altura, al terminarse la influencia de la carga eléctrica propia de la termósfera. Se encuentra a partir de los  $600\text{ km}$ , y es la región donde orbitan la mayoría de los satélites artificiales y donde los fenómenos meteorológicos no tienen la menor influencia.

Todas estas capas están divididas entre sí por subcapas de temperatura constante. Estas pequeñas capas intermedias conservan el nombre de la capa inicial más el sufijo pausa: *tropopausa*, *estratopausa*, *mesopausa* y *termopausa*.

**Nota.** Una capa bastante nombrada en la composición de la atmósfera es la ionósfera. Esta capa se encuentra normalmente a los  $80\text{ km}$  de altura, no hace parte de la división de la atmósfera según su temperatura, y es una capa que contiene gran cantidad de iones, lo que permite la reflexión de las ondas largas de radio. La FAC utiliza esta capa para sus comunicaciones de voz en frecuencia HF (*High Frequency*).



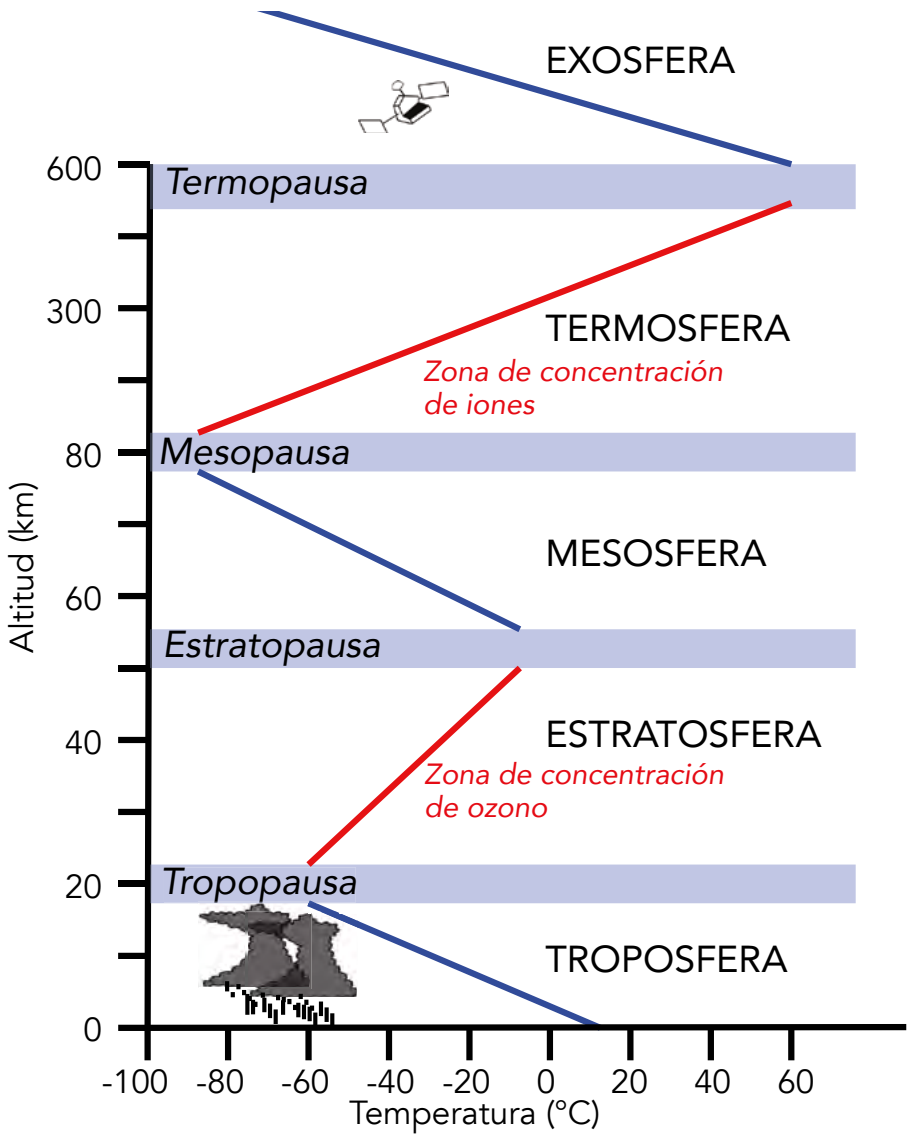


Figura 4. Capas de la Atmósfera.  
Fuente: elaboración propia.

## 1.7. Atmósfera tipo

---

Siendo la atmósfera un medio esencialmente variable, fue necesario definir la Atmósfera Estándar para contar con unos parámetros de referencia universales, útiles para la calibración de los instrumentos de medición, diseño y rendimiento de aeronaves, etc.

34

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) definió la *atmósfera tipo*, o *atmósfera estándar*, como un estado atmosférico en el cual la temperatura, la presión y la densidad atmosférica presentan una distribución hipotética vertical conocida como ISA (*International Standard Atmosphere*). Es una atmósfera de referencia basada en promedios climatológicos que asume entre otros, los siguientes valores y gradientes al nivel medio del mar:

- Aceleración debida a la gravedad:  $9,80665 \text{ m/s}^2$ .
- Densidad:  $1\,225 \text{ g/m}^3$ .
- Presión:  $760 \text{ mmHg}$ ,  $1\,013,25 \text{ mb}$  o  $29,92 \text{ "Hg}$ .
- Temperatura:  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Gradiente térmico vertical en donde la temperatura disminuye con la altura  $0,65 \text{ }^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$  o  $2 \text{ }^\circ\text{C} / 1\,000 \text{ ft}$ .
- Gradiente de presión en donde la presión disminuye con la altura  $1 \text{ mb} / 9 \text{ m}$  o  $1 \text{ "Hg} / 1\,000 \text{ ft}$ .

## 1.8. Coordenadas geográficas

---

Las coordenadas geográficas son líneas imaginarias que dividen la Tierra y normalmente están dadas en términos de grados, minutos y segundos.

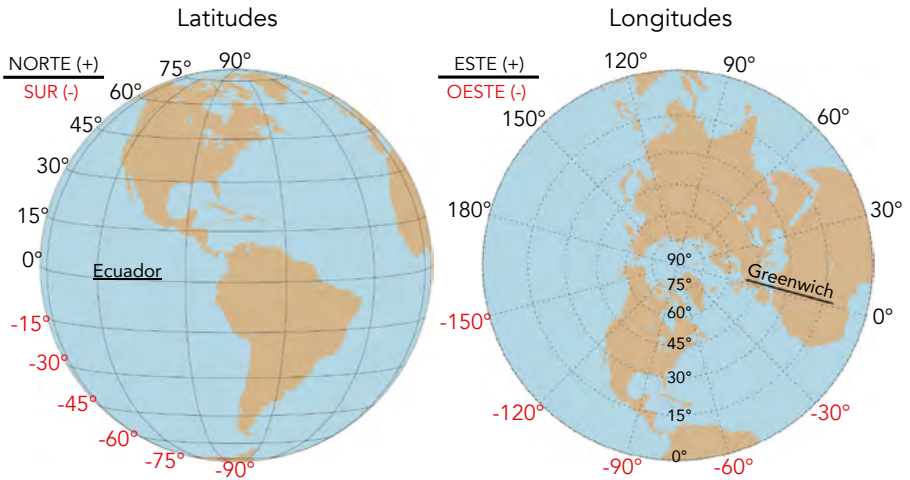
La *latitud* mide el ángulo desde el ecuador hasta el polo norte (de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ ) o desde el ecuador hasta el polo sur (de  $0^\circ$  a  $-90^\circ$ ). Las líneas de latitud se llaman *paralelos*, las cuales son circunferencias paralelas al ecuador –donde se tiene el mayor círculo de latitud– y disminuyen hacia los polos, donde se reducen a un punto.

La *longitud* mide el ángulo entre un punto de la superficie terrestre y el meridiano de Greenwich, el cual pasa por el Real Observatorio de Greenwich (Londres), y al cual se le asigna el valor  $0^\circ$ . La longitud se mide desde meridiano de Greenwich hasta el este (de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ ) y desde el meridiano de Greenwich hasta el oeste (de  $0^\circ$  a  $-180^\circ$ ). Las líneas de longitud son circunferencias llamadas *meridianos*, cuyo diámetro es el eje terrestre y que concurren en los polos. Todos los meridianos tienen el mismo tamaño.

Teniendo en cuenta que la línea imaginaria del ecuador divide al planeta en latitudes positivas y negativas, y que el meridiano de Greenwich hace lo mismo en longitudes



positivas y negativas, puede asignarse una localización exacta a cualquier lugar de la Tierra. Sin embargo, es más común referirse a estos puntos cardinales reemplazando el signo por las terminaciones N (norte), S (sur), E (este) y W (oeste), tal como se muestra en la figura 5.



**Figura 5.** Coordenadas Geográficas.  
**Fuente:** elaboración propia.

## 1.9. Husos horarios

Los husos horarios hacen referencia a las 24 zonas de la Tierra que fueron divididas según su longitud geográfica. Teniendo en cuenta que la superficie terrestre tiene 360 meridianos, cada 15° de longitud geográfica hay una hora de variación, por lo que existen 24 husos horarios (360/15). Los husos horarios (figura 6) también hacen referencia al aprovechamiento que le damos los humanos a las horas de sol disponibles en el día y a la necesidad de contar con una hora estándar internacional.

En teoría, los países que compartan un mismo huso horario también tendrían una misma hora local (figura 5), pero las amplias extensiones de territorio, estaciones, política y economía hacen que los países modifiquen su huso horario. Para efectos prácticos, se ha reglamentado una hora internacional para la cual el meridiano de Greenwich sirve como referencia. La hora internacional se conoce como *Universal Time Coordinated* (UTC) u hora Zulu<sup>2</sup> (Z), la cual se usa para todas las coordinaciones aeronáuticas y meteorológicas. Para profundizar la relación entre hora local y hora UTC puede consultar Inzunza (2006).

2 Se utiliza Zulu como parte del alfabeto fonético aeronáutico para referirse a la letra z, letra que ha sido asignada a la zona horaria demarcada por el meridiano de Greenwich.



## Husos Horarios

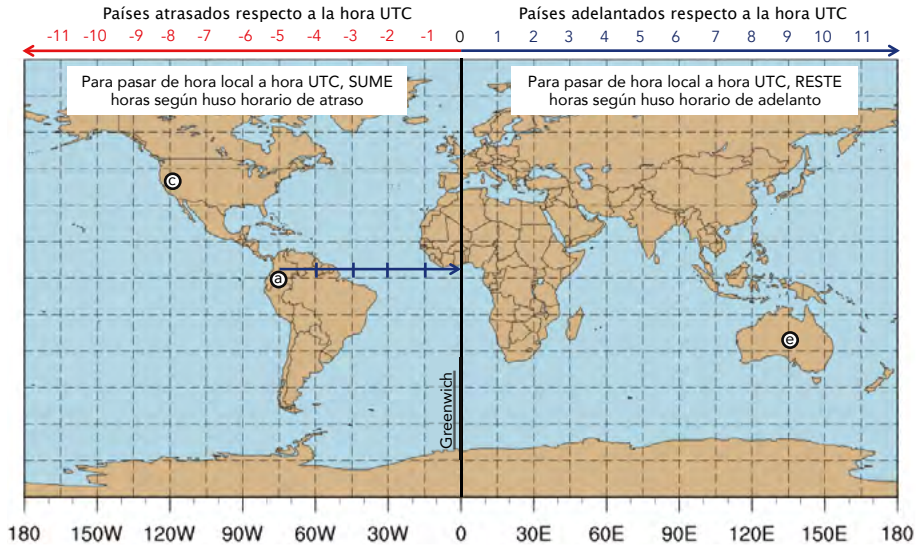


Figura 6. Husos horarios.  
Fuente: elaboración propia.

Ejemplos basados en la figura 6:

- Si usted está ubicado en Bogotá (Colombia) y son las 7:00 am hora local, ¿qué hora UTC o Zulu es en Bogotá?

$75/15 = 5$	Como Colombia está bajo el huso horario del meridiano -75, se divide 75 entre 15 (cada 15 meridianos cambia el huso horario en más o menos una hora).
7:00 am + 5	Sabiendo que Colombia está ubicada en un meridiano negativo (al Whiskey <sup>3</sup> del meridiano de <b>Greenwich</b> ), se suma el resultado de la división (en este caso, 5).
12:00 UTC	El resultado se expresa en horas UTC o Zulu.

**Respuesta:** Cuando en Bogotá son las 07:00 am, la hora también puede expresarse como las 12:00 UTC o las 12:00 Z.

- Si usted está ubicado en el punto "a" y son las 16:00 hora local, ¿Cuál es la hora local en el punto "e" y "c"?

Hora en el Punto E	
16:00 + 14 horas	Siempre que se desea saber la hora local de un país ubicado al Eco <sup>4</sup> del punto de referencia, se deben sumar los husos horarios $(75/15) + (135/15) = 5+9 = 14$
06:00 hora local	El punto "e" presenta 14 horas de diferencia respecto al punto "a" por encontrarse al Eco del punto de referencia

**Respuesta:** Cuando en el país "a" son las 16:00 (local), en el país "e" son las 06:00 (local) del día siguiente.

3 Whiskey hace parte del alfabeto fonético aeronáutico utilizado para referirse a la letra W, que en este caso representa el Oeste de un punto de referencia.  
4 Eco hace parte del alfabeto aeronáutico utilizado para referencia a la letra E, que representa el punto Este de un sistema de referencia.



Hora en el Punto C	
16:00 – 3 horas	Siempre que se desea saber la hora de un país ubicado al Whiskey del punto de referencia, se deben restar los husos horarios $(75/15) - (120/15) = 5 - 8 = -3$
13:00 hora local	El país "c" presenta 3 horas de diferencia respecto al país "a" por encontrarse al Whiskey del punto de referencia

**Respuesta:** Cuando en el país "a" son las 16:00 local, en el país "c" son las 13:00 (local) o 01:00 pm.



# Capítulo 2

# Temperatura

---

- 2.1 Temperatura y calor
- 2.2 Radiación solar
- 2.3 Variaciones de temperatura
- 2.4 Inversión térmica
- 2.5 Escalas de temperatura



## 2.1 Temperatura y calor

---

Enuncia la primera ley de la termodinámica que la *energía no se pierde ni se destruye; se transforma*. Sin embargo, un cuerpo con energía térmica puede interactuar con su alrededor y, por supuesto, causar un intercambio de energía, siempre de mayor a menor temperatura. Este intercambio de energía es conocido como calor cuando el origen de la transferencia es una diferencia de temperatura; en caso contrario se considera trabajo.

Según su número, tamaño y estado, las moléculas de un cuerpo vibran y poseen energía cinética. La temperatura es la medida de la energía interna del cuerpo y, por lo tanto, equiparable al promedio de la energía cinética de las moléculas.

La energía o calor de un cuerpo puede ser expresada en calorías (cal) o en Joules (J). Una caloría es la cantidad de calor necesaria para elevar en 1 °C la temperatura de 1 gramo de agua, mientras que el Joule se define como la cantidad de trabajo realizado por una fuerza constante de 1 Newton (N) en 1 m. La incomodidad para realizar medidas en calorías hizo más práctico introducir el término temperatura, la cual es un indicativo de la cantidad de calor de un cuerpo.

## 2.2 Radiación solar

---

La radiación electromagnética es una forma de energía emitida por cualquier cuerpo cuya temperatura sea mayor del cero absoluto (0 °K). Cada componente del sistema Tierra-atmósfera emite radiación en todo momento y en todas direcciones. También la emite el Sol y constituye la principal fuente de energía utilizada en todos los procesos en los que interactúan Tierra y Atmósfera, y está compuesta principalmente por radiación visible, infrarroja y ultravioleta, las cuales se desplazan a la velocidad de la luz (300 000 000 m/s).

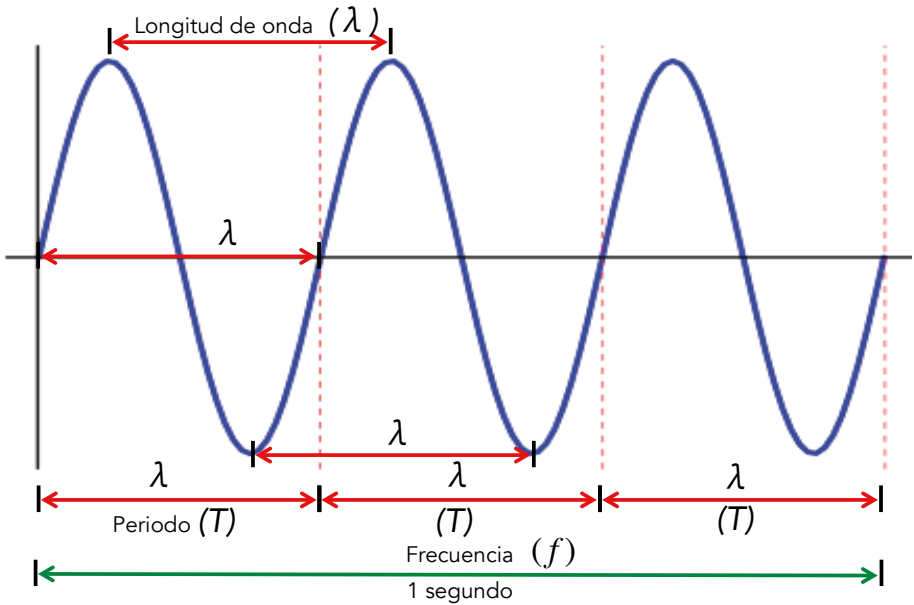
### 2.2.1 División de la radiación según la longitud de onda

La Tierra y el Sol emiten radiación en forma de ondas electromagnéticas las cuales son definidas a través de su longitud y frecuencia. La *longitud de onda* ( $\lambda$ ) es la distancia que recorre una onda completa antes de que su forma se repita, puede ser medida en metros (m) hasta micrómetros o micras ( $\mu\text{m}$ ). Un micrómetro es igual a  $10^{-6}$  metros ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ).

Se conoce como *Periodo* ( $T$ ) al tiempo en segundos requerido para completar una  $\lambda$ . Se denomina *frecuencia* ( $f$ ) al número de veces que se repite  $\lambda$  en 1 segundo, se mide en hercios (Hz) y es inversamente proporcional a la longitud de onda.



La figura 7 muestra la relación entre longitud de onda, periodo y frecuencia, en este ejemplo  $f = 3 \lambda/s$ , o lo que es igual,  $f = 3 \text{ Hz}$ .



**Figura 7.** Longitud de onda.  
Fuente: elaboración propia.

La radiación de onda menor a  $3 \mu\text{m}$  se denomina *radiación solar* o *radiación de onda corta*. La radiación de onda mayor a  $3 \mu\text{m}$  se denomina *radiación terrestre* o *radiación de onda larga*, de acuerdo con la tabla 3.

**Tabla 3.** Clasificación de onda corta y larga.

Tipo de radiación	Longitud de onda
Radiación solar o radiación de onda corta	$< 3,0 \mu\text{m}$ 0,01 – 0,4 $\mu\text{m}$ 0,4 – 0,75 $\mu\text{m}$ 0,75 – 3,0 $\mu\text{m}$
Ultravioleta	
Visible	
Infrarrojo cercano	
Radiación terrestre, infrarroja o radiación de onda larga	$> 3,0 \mu\text{m}$

Fuente: elaboración propia.

**Radiación ultravioleta.** Comprendida entre  $0,01$  y  $0,4 \mu\text{m}$ , es invisible y no produce calor, pero causa fuertes daños a la piel. Este tipo de radiación es más intensa en zonas de mayor altitud donde la densidad del aire es menor y la atmósfera absorbe una menor cantidad de radiación.

**Radiación visible.** Ubicada en longitudes de  $0,4$  a  $0,75 \mu\text{m}$ . Es la única visible por el ojo humano, pero no puede sentirse. Es una mezcla del color rojo ( $0,75 \mu\text{m}$ ), anaranjado ( $0,6 \mu\text{m}$ ), amarillo ( $0,57 \mu\text{m}$ ), verde ( $0,52 \mu\text{m}$ ), azul ( $0,47 \mu\text{m}$ ) y violeta ( $0,4 \mu\text{m}$ ).

**Radiación infrarroja.** Ubicada entre longitudes de  $0,75$  y  $120 \mu\text{m}$ . Es invisible, pero se siente en forma de calor. Es la principal responsable del calentamiento de la atmósfera.



En realidad, el espectro electromagnético contiene todas las posibles longitudes y frecuencias de ondas, además de los tres rangos indicados, como se muestra en la figura 8.

42

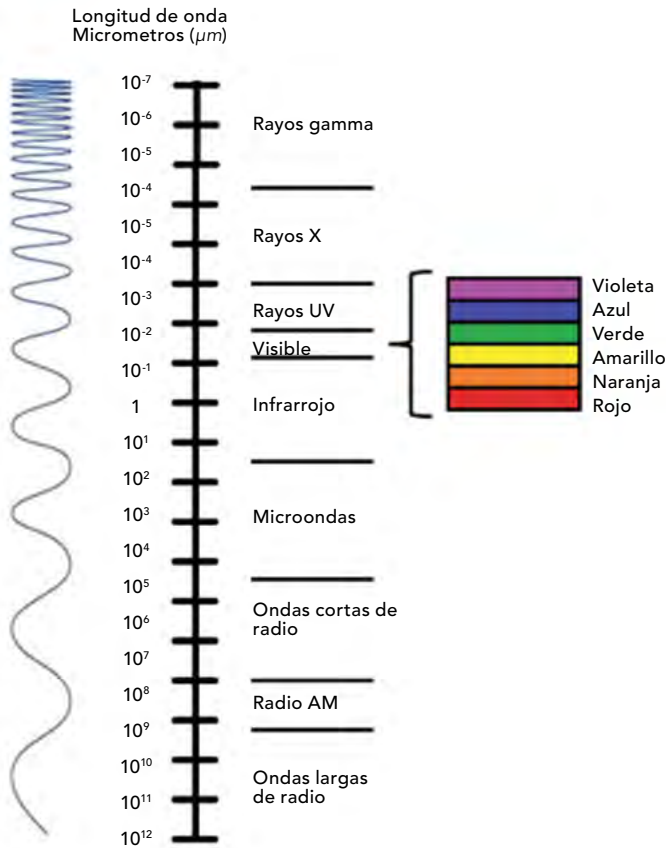


Figura 8. Espectro electromagnético.

Fuente: elaboración propia.

### 2.2.2 Efectos de la atmósfera sobre la radiación solar

La energía solar que llega a la Tierra es tradicionalmente cuantificada en términos de la constante solar. Ésta es la radiación solar recibida en ausencia de la atmósfera, a la distancia media Tierra-Sol ( $1\,496 \times 1\,011\text{ m}$ ), en promedio sobre una superficie plana orientada perpendicularmente a los rayos solares.

Según la WMO (1982), la Tierra recibe en el límite superior de su atmósfera una cantidad de radiación solar promedio de  $1\,367\text{ W/m}^2$ , valor que se denomina constante solar. Este valor varía de acuerdo a la distancia Tierra-Sol en perihelio y en afelio, manchas solares e inclinación del eje de rotación de la Tierra, entre otros (Tejada, 2015). A pesar de recibir  $1\,367\text{ W/m}^2$ , no toda la superficie de la Tierra está expuesta al Sol y el ángulo de incidencia varía, situación que implica una *constante solar media* de  $1/4$  de la radiación solar entrante, es decir  $341\text{ W/m}^2$  aproximadamente.



Debido al efecto de la atmósfera sobre la radiación, sólo una parte alcanza la superficie de la Tierra. Dos causas alteran fuertemente la radiación solar en su paso a través de la atmósfera: la reflexión y la absorción. Trenberth et al (2009) explican la influencia de estos factores si se considera como 100 % la radiación que llega al tope de la atmósfera:

- La **reflexión** causa que un 29 % de la radiación sea devuelta al espacio. De ese porcentaje, un 7% es radiación reflejada por la superficie de la Tierra y un 22 % por las nubes y las capas de la atmósfera.
- Por medio de la **absorción**, se distribuye el 71 % restante. Mientras el 23 % es absorbido por la atmósfera, el otro 48 % es absorbido por la superficie de la Tierra, que al calentarse irradia a la atmósfera radiación de onda larga, la cual permite el calentamiento atmosférico.

### 2.2.3 Efecto selectivo de la atmósfera

El comportamiento selectivo consiste en que la atmósfera deja pasar fácilmente las radiaciones de onda corta, provenientes del Sol, mientras que absorbe y dificulta el paso de las radiaciones de longitud de onda larga, irradiadas por la Tierra (figura 9).

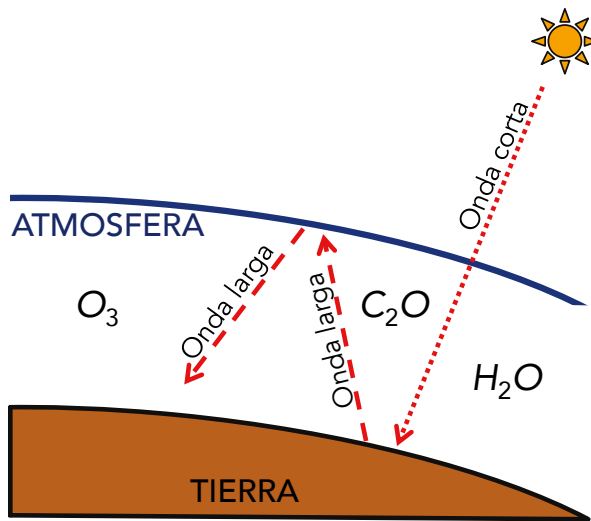


Figura 9. Efecto selectivo de la atmósfera.

Fuente: elaboración propia.

Debido a que la radiación entrante emitida por el Sol es de onda corta, la atmósfera la retiene en menor cantidad y permite que la mayor parte de la radiación llegue hasta la superficie de la Tierra, donde los rayos solares son absorbidos causando calentamiento. Una vez que la Tierra se ha calentado, irradia su calor en longitudes de onda larga (rayos infrarrojos), que pueden ser retenidos por el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros gases presentes en la atmósfera y causantes del efecto de invernadero. Por consiguiente, el Sol no calienta directamente a la atmósfera, sino que lo hace por intermedio de la Tierra.

El efecto de invernadero es un efecto natural y beneficioso que mantiene una temperatura media de 15 °C en la Tierra; de no ser así, la temperatura sería demasiado baja para



mantener la vida en la Tierra. El peligro del efecto invernadero es que se intensifique por la presencia de contaminantes atmosféricos, productos de la combustión en fábricas, automóviles, etc. Estos contaminantes también absorben la radiación de onda larga, irradiada por la Tierra, lo que produce un incremento de la temperatura media en el planeta; es decir, un sobrecalentamiento artificial de la atmósfera.

## 2.3 Variaciones de temperatura

La cantidad de energía solar recibida en cualquier región del planeta varía por diferentes factores, entre ellos la hora del día, la latitud, estación del año, distribución de distintos tipos de superficies y en función de la elevación.

### 2.3.1 Variación diurna

Se define como el cambio de temperatura entre el día y la noche, producido por el movimiento de rotación<sup>5</sup> de la Tierra

En Colombia, debido a su ubicación tropical, la temperatura es poco influenciada por las masas de aire de latitudes medias y sus fluctuaciones dependen fundamentalmente del ciclo diurno (calentamiento por efecto del Sol). La figura 10 muestra la variación horaria de temperatura que presentó el aeródromo de Palanquero (SKPQ) el 20 de agosto de 2015.

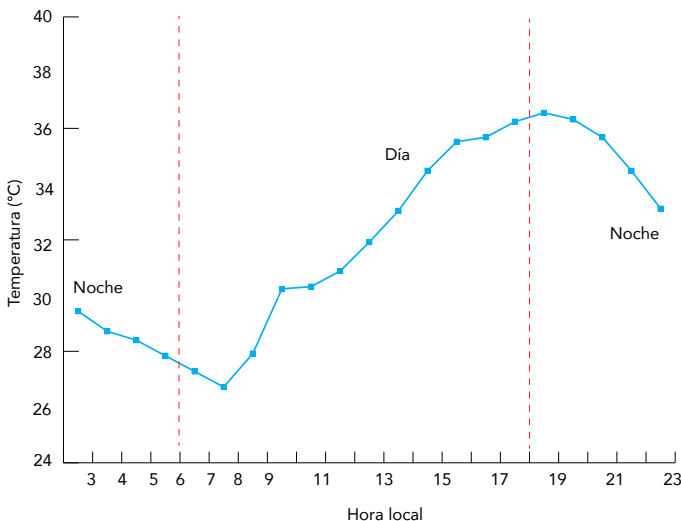


Figura 10. Variación horaria de la temperatura en SKPQ el 20/AGO/15.

Fuente: elaboración propia.

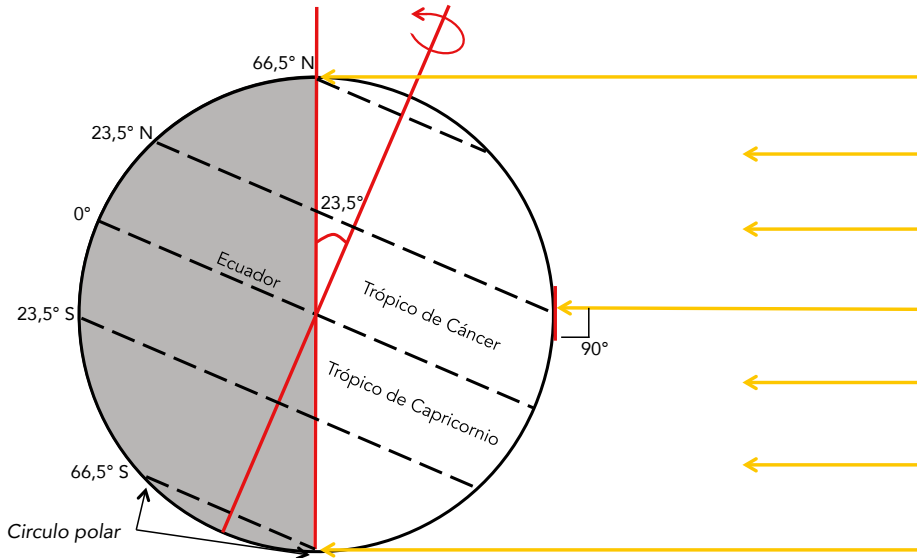
5 La rotación terrestre es el movimiento giratorio del planeta Tierra sobre su propio eje. El movimiento se realiza hacia el este en ciclos de 24 horas.



### 2.3.2 Variación de la temperatura con la latitud

Debido a que el ángulo de incidencia de los rayos solares varía con la latitud geográfica (figura 11), las zonas que más podrían calentarse son las comprendidas entre el trópico de cáncer y el trópico de capricornio, las cuales están expuestas a un ángulo de incidencia de  $90^\circ$ . Esta distribución natural de la temperatura sobre la esfera terrestre produce diferencias de temperatura en todo el planeta. Las zonas polares son alcanzadas oblicuamente por los rayos solares, de tal manera que el polo expuesto al Sol tiene un calentamiento leve y el otro polo queda en total oscuridad por 6 meses.

45

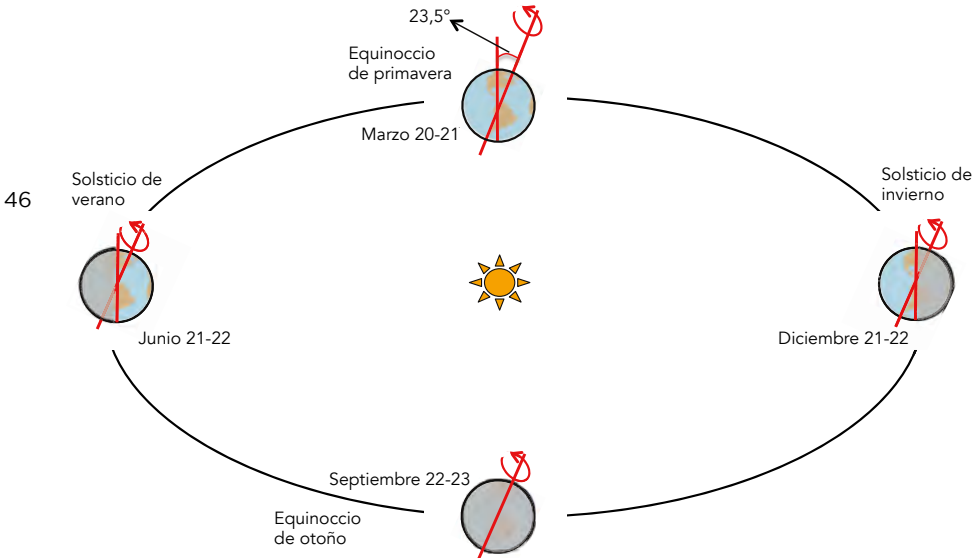


**Figura 11.** Variación latitudinal de la temperatura.

**Fuente:** elaboración propia.

### 2.3.3 Variación estacional

La temperatura de la Tierra varía según las estaciones del año (figura 12): verano, otoño, invierno y primavera. Las estaciones son causadas por el ángulo de inclinación de la Tierra ( $23,5^\circ$ ), el cual impide la distribución homogénea de los rayos solares, evitando la incidencia de los mismos en alguna de las zonas polares según la época del año. Aun cuando la Tierra realiza su movimiento de rotación y traslación, durante seis meses el Sol no logra calentar la superficie de alguno de los polos. Países como Colombia –ubicados en la línea ecuatorial– no poseen estaciones; sus días y sus noches son de 12 horas casi exactas, y en ellos oscurece con regularidad a las 18:00 horas y amanece a las 06:00 horas. Países en zonas extratropicales experimentan diferentes horas de luz según la estación del año.



**Figura 12.** Estaciones del año.

**Fuente:** elaboración propia.

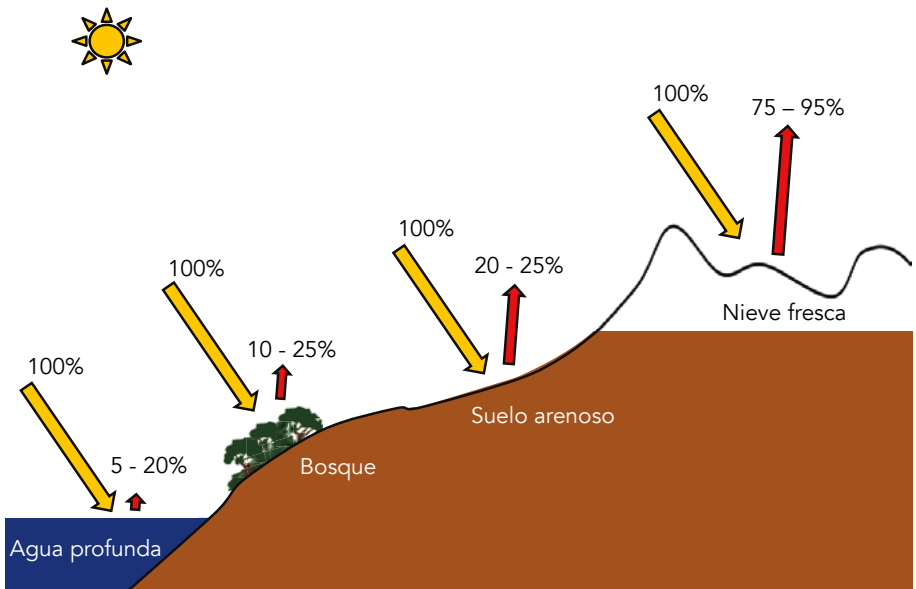
### 2.3.4 Variaciones con los tipos de superficie

Influye directamente en la temperatura debido a varios factores:

- En la Tierra existen diferentes tipos de suelos definidos por sus características físicas (estructura, densidad, temperatura), químicas (cantidad de nutrientes, acidez), textura, y uso de suelo, entre otros. Stull (2016) presenta un albedo<sup>6</sup> típico relacionado con estas características (figura 13), en donde superficies con albedo alto como la nieve reflejan la mayor parte de la energía electromagnética que reciben, a diferencia del agua y los bosques con el albedo más bajo; por lo tanto, tienden a absorber la energía electromagnética que reciben.
- La temperatura de la tierra tiene diferencias de amplitud mucho más altas que las presentes en el agua.
- La tierra se calienta y se enfría mucho más rápido que el agua.
- La distribución de continentes y océanos en el hemisferio norte o sur.

6 Albedo es la capacidad que tiene una superficie para reflejar la radiación electromagnética.





**Figura 13.** Tipos de superficie y albedo.  
**Fuente:** elaboración propia.

### 2.3.5 Variaciones con la altura

En la primera capa de la atmósfera (troposfera), la temperatura normalmente decrece con la altura. Esta disminución se conoce como *gradiente vertical de temperatura*, y se define como un cociente entre la variación de la temperatura y la variación de altura, entre dos niveles. En la troposfera el gradiente vertical de temperatura medio es de  $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  o de  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ 000 ft}$ , y es el utilizado para calcular rápidamente la variación de la temperatura respecto a la altura. Sin embargo, no debe olvidarse que existen en la atmósfera dos tipos de gradientes: el gradiente adiabático<sup>7</sup> seco y el húmedo.

El gradiente adiabático seco se utiliza para calcular la disminución de la temperatura respecto a la altura cuando la parcela de aire aún no ha alcanzado la saturación y por lo tanto la humedad relativa es menor al 100 %, el valor de este gradiente se aproxima a  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  y es relativamente constante, es decir, no depende de la temperatura ni de la presión. El gradiente adiabático húmedo es en promedio de  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ —mucho menor que el gradiente seco—, porque al condensarse el agua se libera calor latente evitando que la temperatura disminuya rápidamente; este gradiente puede variar en función de la temperatura y la presión (figura 14).

Por sus condiciones tropicales y alto contenido de humedad, en Colombia el gradiente vertical de la temperatura oscila desde  $0,46\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la región del Pacífico, hasta  $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la región Andina cada vez que se ascienden 100 metros de altura (Eslava, 1994). Para todo Colombia y a diferencia del gradiente medio de  $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}$  usado típicamente en Colombia, Eslava (1992b) concluyó que un gradiente promedio más adecuado sería  $0,55\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ . Sin embargo, a menudo se registra un aumento de temperatura con la altura en la troposfera denominado *inversión de temperatura* o *inversión térmica*.

<sup>7</sup> Se considera un proceso adiabático cuando se asume que la parcela de aire en ascenso o descenso no intercambia calor con su entorno.





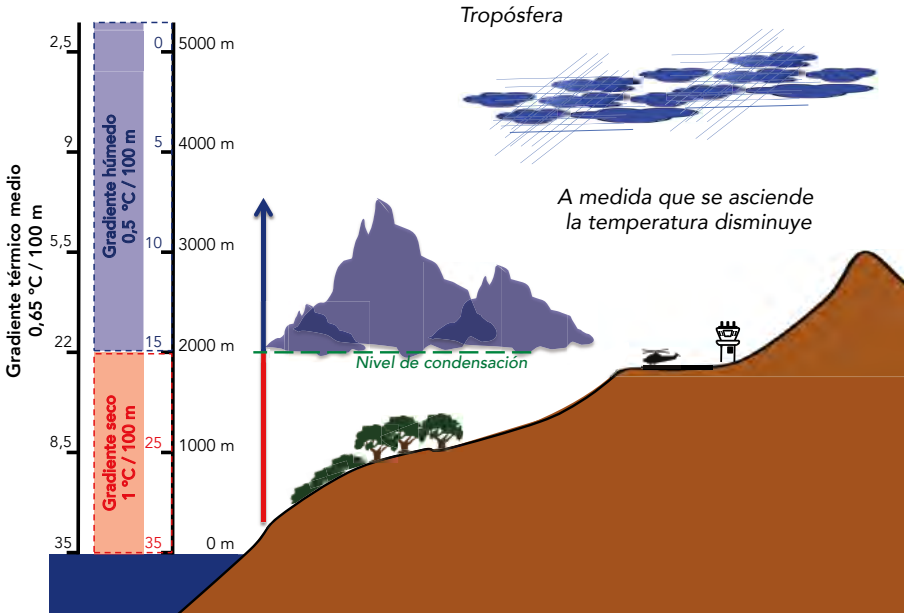


Figura 14. Disminución de la temperatura con la altura.  
Fuente: elaboración propia.

## 2.4 Inversión térmica

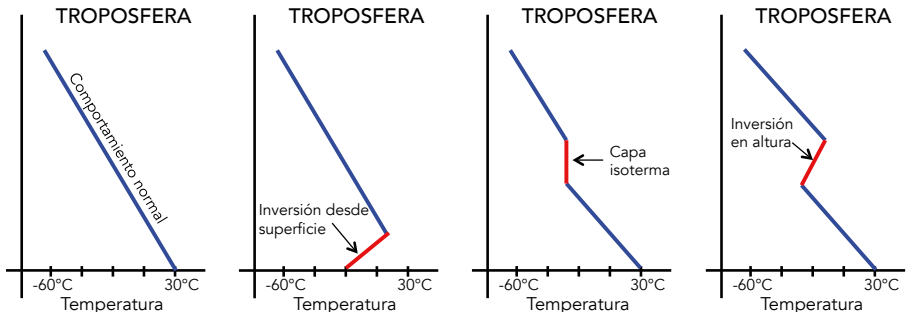
Se conoce como inversión térmica al fenómeno por el cual la temperatura aumenta con la altura y no sigue su comportamiento normal en la tropósfera (disminuir con la altura). Una inversión de temperatura se puede desarrollar en las capas de aire que están en contacto con la superficie terrestre, durante noches despejadas y frías, y en condiciones de calma o de vientos muy suaves. También puede presentarse en altura como consecuencia del descenso, compresión, y por lo tanto, calentamiento de una capa de aire asociada a un anticiclón<sup>8</sup> (figura 15). Superada esta capa de inversión térmica, la temperatura comienza a disminuir nuevamente con la altura, restableciéndose las condiciones normales en la tropósfera.

Una inversión térmica puede detectarse por métodos de medición sofisticados –como radiosondeos– o de forma visual cuando se observa smog<sup>9</sup> en las ciudades.

<sup>8</sup> Sistema de alta presión asociado al buen tiempo.

<sup>9</sup> Partículas contaminantes suspendidas en el aire sin posibilidad de ascenso.





**Figura 15.** Tipos de inversión térmica.  
**Fuente:** elaboración propia.

La inversión térmica es especialmente peligrosa para los pilotos que sobrepasan u operan muy cerca a los límites operacionales de sus aeronaves. En un caso de ejemplo: un piloto de UH-1H está haciendo relevos de soldados desde la base militar de CACOM-4 (Melgar, Tolima) hasta el cerro la María, son las 08:00 horas y desea hacer el cálculo de cuanto peso estaría en capacidad de transportar, para esto debe conocer:

**a. Peso de su aeronave:**

- **Peso básico:** el peso básico de una aeronave es el peso que incluye todos los sistemas hidráulicos y sistemas de aceite llenos, el combustible atrapado e inservible y todo el equipo fijo. El peso básico varía con las modificaciones estructurales y cambios al equipo fijo de la aeronave.
- **Peso de operación:** el peso de operación incluye el peso básico más la tripulación, el equipaje de la tripulación, equipo de emergencia u otro equipo que pueda ser requerido.
- **Peso bruto o peso al despegue:** el peso bruto es el peso de operación más el peso del combustible, munición, carga o tanques externos de combustible auxiliar.

Los pesos usuales para la operación del Huey UH-1H pueden resumirse a manera de ejemplo en la tabla 4.

**Tabla 4.** Discriminación de los diferentes tipo de peso en una configuración operacional típica para un helicóptero Huey UH-1H.

<b>Peso básico</b>	<b>7 000 lb</b>
Piloto	+ 170 lb
Copiloto	+ 170 lb
Técnico de vuelo	+ 170 lb
Kit supervivencia	+ 90 lb
<b>Peso de operación</b>	<b>7 600 lb</b>
Combustible	+ 1 200 lb
Carga	+ 1 450 lb
<b>Peso bruto</b>	<b>10 250 lb</b>

**Fuente:** elaboración propia.



**b. Elevación del terreno:**

Elevación de Melgar: 1 000 ft.  
 Elevación cerro La María: 5 000 ft.

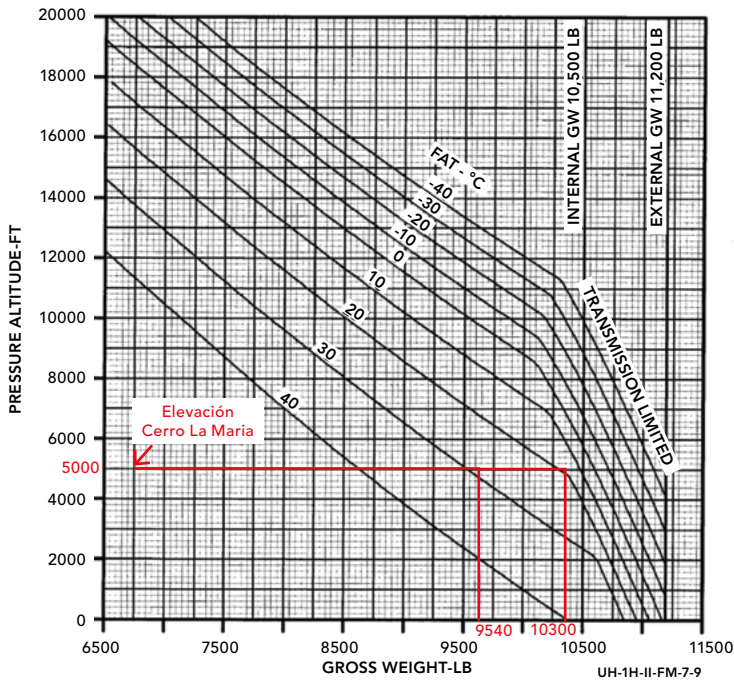
**c. Peso máximo autorizado al despegue:**

50

El peso máximo autorizado al despegue se rige por la tabla de rendimiento de cada aeronave y depende únicamente de dos factores, la elevación del terreno –que no varía– y la temperatura, que es fácilmente medible en cualquier aeródromo. El problema podría presentarse especialmente en helicópteros, los cuales operan en sitios donde no se cuenta con toda la instrumentación.

Si el piloto no cuenta con un instrumento para medir la temperatura en el cerro la María y hace un cálculo rápido basado en una temperatura de 28 °C en la Base Aérea de Melgar, podría pensar que la temperatura en La María es de 20 °C, 8 °C menos como consecuencia de los 4 000 ft de diferencia entre las dos elevaciones y un gradiente de 2 °C cada 1 000 ft. Sin embargo, en ese momento la temperatura real en el cerro podría alcanzar los 30 °C, temperatura mayor que la registrada en Melgar como consecuencia de una inversión térmica. Este nuevo panorama modifica el peso máximo al despegue, tal como se muestra en la figura 16.

Si la temperatura fuera de 20 °C, el piloto podría despegar con un máximo de 10300 lb, así que podría aceptar un peso al despegue de 10 250 lb (operando muy cerca a los límites), pero si en ese momento, la temperatura real fuera de 30 °C, sólo podría despegar con 9 540 lb. Si decide despegar con 10 250 lb, podría causar un accidente aéreo debido a que estaría por encima de sus límites operacionales.



**Figura 16.** Peso máximo al despegue sin efecto tierra.

**Fuente:** Tomado del manual de vuelo del UH-1H.



La temperatura se mide en las inmediaciones de la pista. En un día muy caluroso y en calma, pueden encontrarse diferencias de temperaturas entre diferentes sectores del aeródromo; cuando hay viento, las diferencias de temperatura en el entorno de la pista son mínimas. La temperatura es tan importante para la operación de aeronaves de ala rotatoria en entornos de alta dificultad como los cerros y pináculos, que muchas veces su operación se ve restringida por la hora del día en que la temperatura es muy alta, toda vez que afecta significativamente la densidad y aumenta la intensidad de viento.

Al utilizar la ecuación de estado se puede identificar que la temperatura influye en la densidad del aire de forma inversamente proporcional: a menor temperatura, mayor densidad del aire, tal como sucede en la tropósfera, donde a medida que la aeronave gana altura, la temperatura disminuye. El problema que se presenta en las inversiones térmicas es que a medida que la aeronave gana altura, la temperatura aumenta y la densidad disminuye, causando problemas de sustentación para la aeronave, ya que está sobrevolando un entorno fuera de las condiciones estándar.

### Ecuación de Estado

$$PV = nRT$$

Donde:

$$PV = \frac{nRT}{V}$$

$P$  = Presión

$$PV = \rho RT$$

$V$  = Volumen

$$\frac{P}{RT} = \rho$$

$n$  = Numero moles (masa)

$\rho$  = Densidad

$T$  = Temperatura

$R$  = Constante de los gases

## 2.5 Escalas de temperatura

En temperatura, se usan las escalas Celsius, Fahrenheit y Kelvin (figura 17), siendo esta última usada sobre todo en experimentos científicos. La escala Celsius fue inventada en 1742 por Anders Celsius, quien declaró que el punto de congelación del agua se alcanza a los 0 grados centígrados y el punto de ebullición se logra cuando la temperatura llega a 100 grados centígrados, invirtiendo de esta forma la "Escala Centígrada" que había sido ideada por Carlos Linneo unos años antes. Linneo propuso que el punto de congelación del agua se presentara a 100 grados centígrados y que su punto de ebullición ocurriera a 0 grados centígrados. En el año de 1948, el término *grados centígrados* fue reemplazado definitivamente por *grados Celsius* (°C).



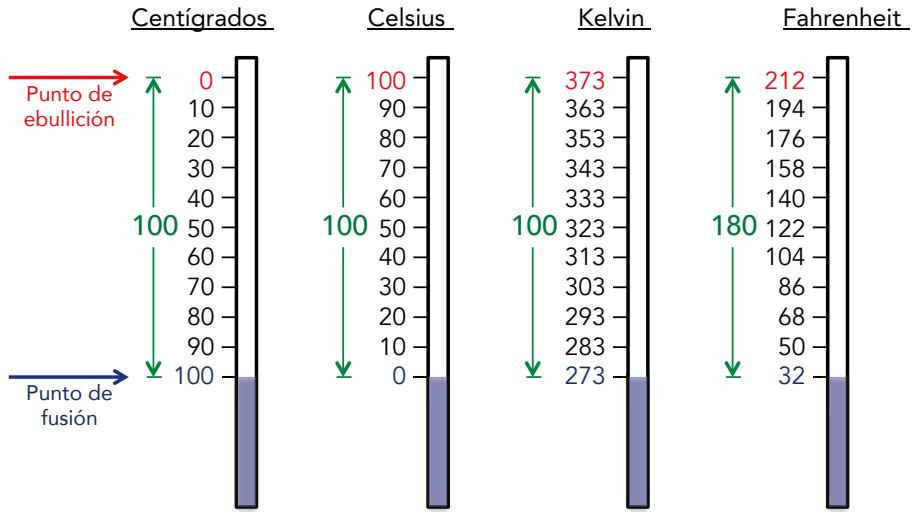


Figura 17. Escalas de temperatura.  
Fuente: elaboración propia.

### 2.5.1 Conversión de valores de temperaturas

Teniendo en cuenta que en Colombia se utilizan los grados Celsius, para convertir grados Kelvin a Celsius –que conservan los mismos 100 grados de diferencia entre el punto de fusión y el punto de ebullición–, sólo es necesario igualar los puntos de fusión ( $K - 273$ ). La conversión de Fahrenheit a Celsius requiere igualar los puntos de fusión ( $F - 32$ ) y multiplicarlo por el cociente de sus diferencias de amplitud entre el punto de fusión y ebullición ( $100/180$ ). De esta manera se pueden inferir las fórmulas de conversión resumidas en la tabla 5.

Tabla 5. Fórmulas de conversión de la temperatura.

De Kelvin a Celsius	$C = K - 273$
De Fahrenheit a Celsius	$C = 100/180 (F - 32) = 5/9 (F - 32)$
De Celsius a Fahrenheit	$F = 180/100 (C + 32) = 9/5 (C + 32)$

Fuente: elaboración propia.



# Capítulo 3.

## Humedad

---

3.1 Definición

3.2 Las nubes

3.3 Cambios de estado

3.4 Comportamiento de la humedad relativa vs. Temperatura

## 3.1 Definición

La humedad es la cantidad de agua presente en la atmósfera. En la tropósfera, el aire siempre contiene agua en mayor o menor medida y puede encontrarse en cualquiera de sus tres estados: sólido (cristales de hielo), líquido (gotas condensadas) y gaseoso (vapor de agua). En aeronáutica esto es importante, ya que los diferentes estados pueden dar lugar a hidrometeoros como nubes, niebla, neblina, lluvia, llovizna, rocío, escarcha, nieve y granizo.

### 3.1.1 Humedad relativa

Es la relación entre la cantidad de vapor real que contiene el aire y la cantidad de vapor que el aire es capaz de contener a cierta temperatura. A mayor temperatura, más capacidad de contener agua. La unidad de medida es el porcentaje.

### 3.1.2 Punto de rocío

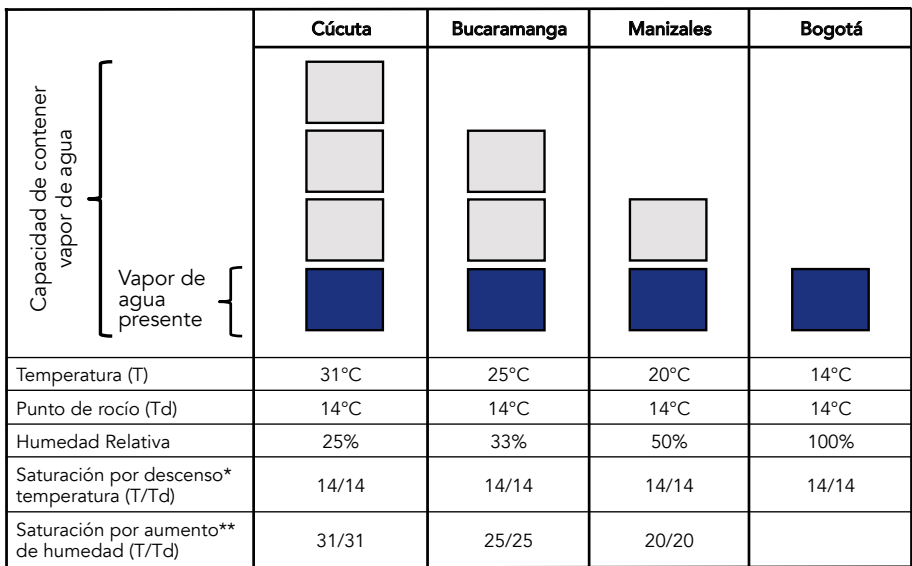
Es la temperatura a la que el aire debe enfriarse a presión constante para que se sature<sup>10</sup> y es un buen indicativo de la humedad existente en el aire. Cuanto mayor es la diferencia entre la temperatura del aire y su punto de rocío, menor será la cantidad de agua presente en la masa de aire. Por el contrario, cuando el punto de rocío y la temperatura del aire se acercan, se considera que la masa de aire es mucho más húmeda –tiene mayor contenido de agua– y se acerca a la saturación.

A modo de ejemplo, como una manera de entender la capacidad del aire caliente para contener agua y su relación con la saturación, se presenta la figura 18. Allí la ciudad con la temperatura más alta –Cúcuta– tiene cuatro cuadros de capacidad para contener agua, pero sólo tiene uno lleno, por eso su humedad relativa es del 25 % (1/4 de su capacidad), Bucaramanga 33 % (1/3 de su capacidad), Manizales 50 % (1/2 de su capacidad) y Bogotá 100 % (toda su capacidad). Aunque las cuatro ciudades tienen la misma cantidad de agua, su humedad relativa es diferente; esto quiere decir que la humedad relativa no es un buen indicador del contenido de vapor de agua en la atmósfera.

Según el ejemplo, Cúcuta tiene dos formas de alcanzar la saturación, la primera es la llegada adicional de vapor de agua a la masa de aire (pasar de 31/14 a 31/31) y la segunda, perder capacidad de contener agua mediante el enfriamiento (pasar de 31/14 a 14/14). En la práctica, las dos temperaturas se encuentran en puntos intermedios, sobre todo en las noches, cuando se produce un descenso en el ciclo diario de la temperatura.

<sup>10</sup> El aire está saturado cuando contiene la máxima cantidad de vapor de agua posible.





\*La temperatura de Cúcuta, Bucaramanga y Manizales disminuye hasta 14°C  
 \*\* La temperatura del punto de rocío aumenta hasta alcanzar la temperatura de la ciudad

**Figura 18.** Influencia de la temperatura en la humedad del aire.  
**Fuente:** elaboración propia.

### 3.1.3 Saturación y condensación

La saturación se presenta cuando la parcela de aire se enfría de tal manera que su temperatura se iguala a la temperatura del punto de rocío, de forma tal que el volumen de aire contiene la mayor cantidad de vapor de agua posible, o cuando la masa de aire recibe mayor humedad, alcanzando igualmente la mayor cantidad de vapor de agua que el volumen de aire puede contener.

La condensación se produce cuando el aire ya está saturado y el vapor de agua cambia de estado gaseoso a líquido, da origen a hidrometeoros como las nubes, la niebla, neblina y el rocío.

## 3.2 Las nubes

Son la manifestación visible del vapor de agua presente en la atmósfera. La presencia de una nube tiene implícita la saturación y la condensación del agua. A medida que una parcela de aire se calienta en superficie y asciende adiabáticamente, se enfría y pierde capacidad para retener el agua, lo cual origina la saturación y posterior condensación.

Las nubes están constituidas por diminutas gotas de agua expuestas a constantes fuerzas y corrientes al interior de la nube, de tal manera que impactan unas con otras aumentando de tamaño y de peso hasta el punto que no logran continuar suspendidas en el aire y se precipitan.





En el trópico, la mayor parte de las nubes se forman por calentamiento del aire en superficie y su tendencia a elevarse siguiendo el gradiente adiabático seco de temperatura hasta el nivel de condensación, tal como se muestra en la figura 19. En Colombia, por ejemplo, el aire cercano al suelo se calienta rápidamente debido al calor irradiado por el Sol, se vuelve más liviano que el aire que le rodea, asciende, se condensa y forma nubes, pero cuando las corrientes ascendentes son muy fuertes y hay bastante concentración de humedad, se forman nubes de desarrollo vertical.

56

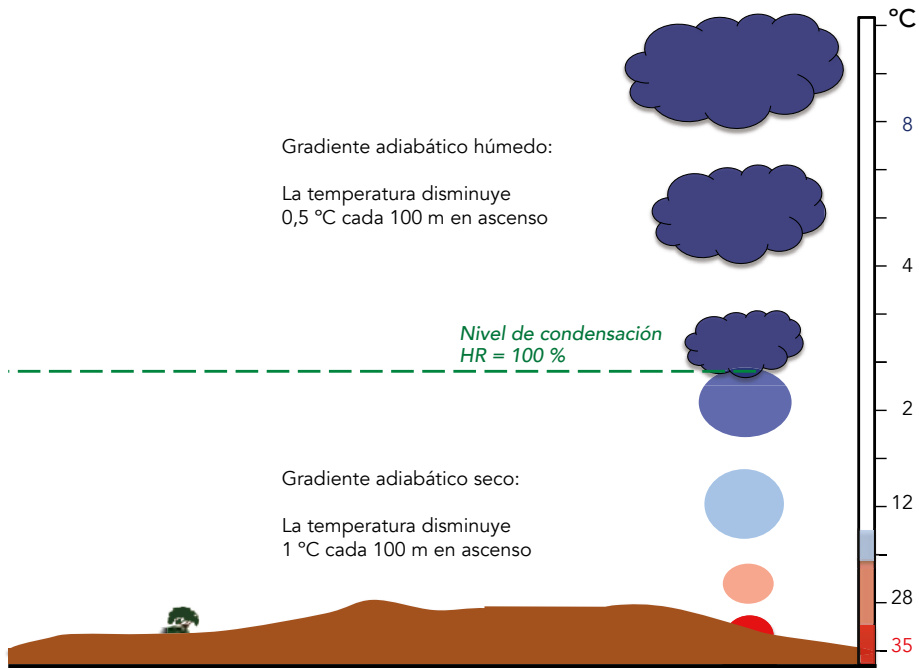


Figura 19. Proceso de formación de nubes.

Fuente: elaboración propia.

### 3.2.1 Tipos de nubes según su altura

La WMO (s.f.) realiza una extensa clasificación de nubes (figura 20), la cual presenta algunas variaciones de acuerdo con los centros meteorológicos de cada país. En Colombia, por ejemplo, se discute si podrían presentarse nubes de tipo nimboestrato y cuál sería su altura; algunos autores las clasifican como nubes bajas o medias. En la Fuerza Aérea Colombiana, se utiliza la clasificación de la tabla 6.



Tabla 6. Clasificación del tipo de nubes según su altura.

Bajas 0 – 2 km 0 – 6 000 ft	Medias 2 km – 6 km 6 000 ft – 20 000 ft	Altas > 6 km > 20 000 ft	Desarrollo Vertical ~0,5 km – 20 km ~1 500 ft – 66 000 ft
Estratos (St) Estratocúmulos (Sc) Nimboestratos (Ns) Cúmulos (Cu)	Alto-cúmulos (Ac) Altoestratos (As) Nimboestratos (Ns)	Cirros (Ci) Cirrocúmulos (Cc) Cirroestratos (Cs)	Torrecúmulos (TCU) Cumulonimbos (Cb)

Fuente: Modificado de WMO (s.f).

**a. Nubes bajas**

**Estratos:** no tienen una estructura ni forma definida. Presentan manchones de diferente opacidad y coloración. Su bajo espesor las hace poco sensibles a la acción del viento, así que su ciclo de vida puede ser más prolongado, permaneciendo activas durante la mayor parte del día.

**Estratocúmulos:** simulan amplias ondulaciones parecidas a cilindros alargados y abultados como bancos de gran extensión con diferentes intensidades de forma y coloración. Rara vez presentan precipitación.

**Nimboestratos:** son muy extensas y de color negro grisáceo. Algunos autores los clasifican dentro de las nubes medias y aún se discute si en Colombia pueden presentarse este tipo de nubes.

**Cúmulos:** presentan un tamaño extenso en la vertical con un color entre blanco y gris. En la parte superior se observan protuberancias que se deforman continuamente, normalmente se asocian a buen tiempo, pero pueden dar lugar a torrecúmulos por condiciones de humedad y corrientes ascendentes.

**b. Nubes medias**

**Alto-cúmulos:** presentan un aspecto grumoso, de tamaño y forma irregular con amplias ondulaciones en su parte inferior. Tienden a estar agrupadas y su diferente espesor es fácilmente distinguible en las imágenes satelitales.

**Altoestratos:** son densas y con apariencia en forma de velo con manchones irregulares. Generalmente se asocian con llovizna persistente y no poseen la forma grumosa de las formaciones tipo cúmulos.

**c. Nubes altas**

**Cirros:** son muy blancas, transparentes y sin sombras, con aspecto de filamentos largos y delgados. Poco influyen en la planeación de operaciones aéreas.

**Cirrocúmulos:** Son totalmente blancas y sin sombras. Forman una capa con arrugas finas y contornos redondeados como copos de algodón.

**Cirroestratos:** tienen la apariencia de un velo, siendo difícil distinguir detalles de estructura. Sus bordes tienen límites definidos y regulares. Pueden producir un fenómeno óptico llamado halo, que se percibe como un círculo luminoso alrededor del Sol o de la Luna.



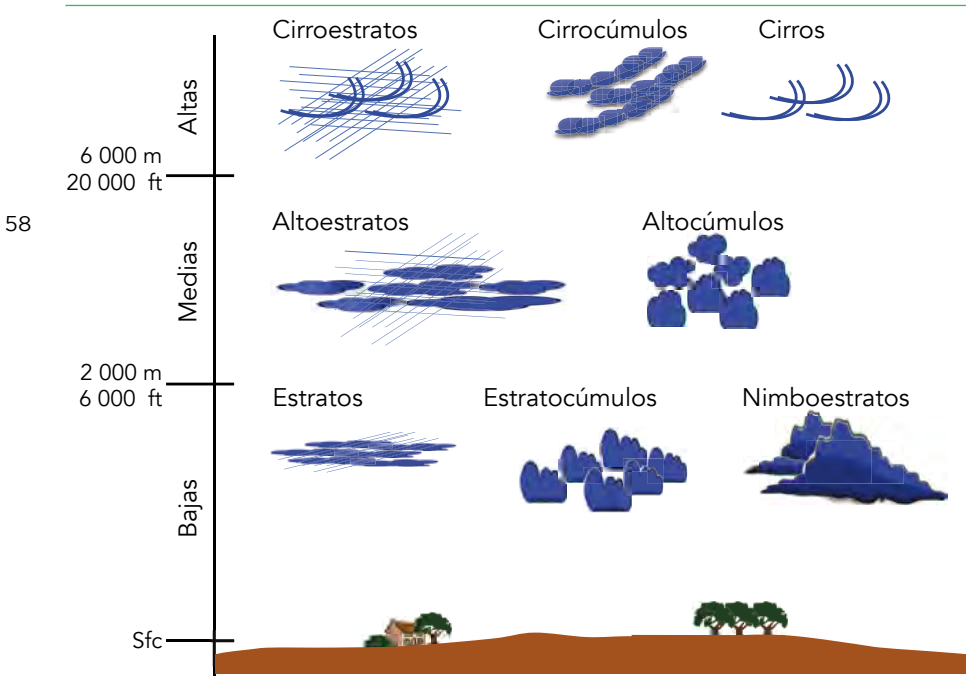


Figura 20. Nubes bajas, medias y altas.

Fuente: elaboración propia.

Para una correcta y efectiva clasificación de nubes utilizando otro tipo de características e imágenes reales, puede consultarse el atlas internacional de nubes de la WMO (s.f.).

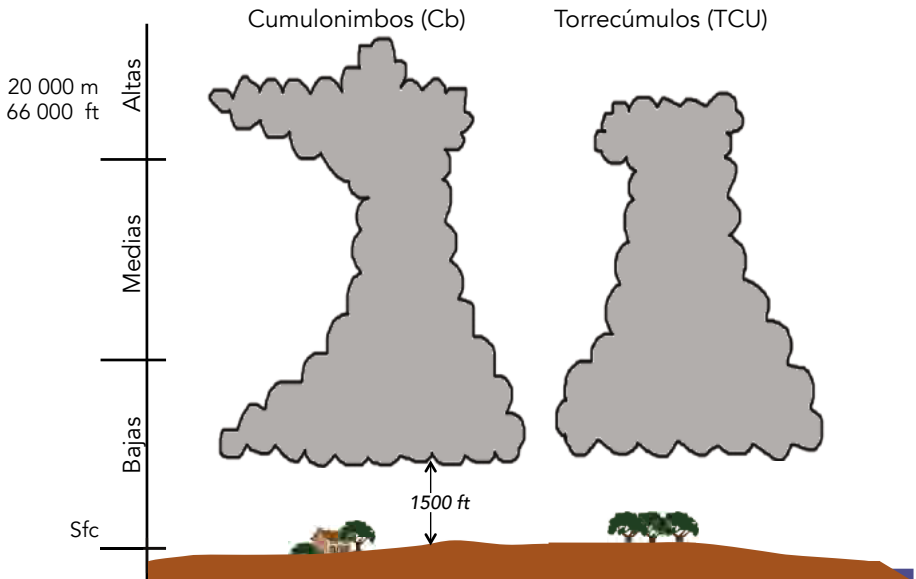
#### d. Nubes de desarrollo vertical

Las nubes de desarrollo vertical son sin duda las nubes más peligrosas para la aviación. Barrero (1997) describe su experiencia con este tipo de nubes mientras pilotaba el avión de combate FAC A-37B: "Se aprecia su inmenso tamaño que parecía no tener límite, cubría el cielo de un lado a otro frente al piloto y hacia arriba no terminaba, era deforme y tal vez lleno de sorpresas, una vez adentro parecía un vientre convulsionado de algún monstruo del espacio".

**Torrecúmulos:** su extensión vertical varía entre los 12 km, su aspecto es generalmente gris oscuro, está compuesto por gotas de agua y cristales de hielo en alturas por debajo de 0 °C. Las corrientes ascendentes superan los 20 kt causando turbulencia entre moderada y severa, así como engelamiento moderado. Se diferencia del Cumulonimbos porque aún no ha alcanzado la máxima extensión vertical y no tiene yunque.

**Cumulonimbos:** Están formados por una columna de aire cálido y húmedo que se eleva en forma de espiral rotatorio. se caracteriza por un yunque bien definido y fuertes protuberancias centrales que sobrepasan su altura máxima. Su base suele encontrarse a menos de 2 km de la superficie y su tope puede alcanzar unos 15 a 20 km de altura en el trópico, producen lluvias intensas, tormentas eléctricas y granizo. Se pueden formar aisladamente, en línea organizada de tormenta (línea de turbonada) y en grupos redondeados o células (Sistemas Convectivos de Mesoescala). Causan turbulencia y engelamiento fuerte.





**Figura 21.** Nubes de desarrollo vertical.

**Fuente:** elaboración propia.

### 3.2.2 Tipos de nubes según su forma

Es otra manera de clasificar las nubes. Howard (1803) y WMO (s.f.) presentan los siguientes tipos de nubes de acuerdo con su forma:

**Cirriforme:** sólo se encuentran después de los 6 km, son nubes altas de forma alargada y aspecto fibroso formadas por cristales de hielo. Incluyen a los cirros, cirrostratos y cirrocúmulos.

**Estratiforme:** tienden a cubrir uniformemente el cielo simulando una especie de velo construido con varias capas grises. Incluyen a los estratos, nimbostratos, altoestratos y cirrostratos.

**Cumuliforme:** son nubes de desarrollo vertical de aspecto denso y una base bien definida. Son de color blanco y blanco grisáceo. Incluyen a los cúmulos, cumulonimbos, stratocúmulos, altocúmulos y cirrocúmulos.

## 3.3 Cambios de estado

Por variaciones de la temperatura, a diferencia de los otros gases atmosféricos, el agua siempre está cambiando de estado (tabla 7). Se define calor latente como la energía necesaria que requiere el agua para cambiar de estado.

Tabla 7. Cambios de estado del agua.

Fases del agua	Inicial	Final	Calor latente
Fusión	sólido	líquido	Absorbe calor latente
Evaporación	líquido	gaseoso	
Sublimación	sólido	gaseoso	
Condensación	gaseoso	líquido	Libera calor Latente
Solidificación	líquido	sólido	
Cristalización	gaseoso	sólido	

Fuente: elaboración propia.

## 3.4 Comportamiento de la humedad relativa vs. temperatura

La humedad relativa y la temperatura tienen un comportamiento unimodal durante el día. Esto quiere decir que tienen un máximo y un mínimo, encontrando que a mayor temperatura, menor humedad relativa. Eso explica por qué la humedad relativa se incrementa en horas de la noche cuando la temperatura es más baja.

La figura 22 muestra el comportamiento horario de estas dos variables en la estación meteorológica ubicada en el aeródromo El Dorado (Bogotá), utilizando los primeros tres días de enero de 2010 e iniciando a las 07:00 hora local.

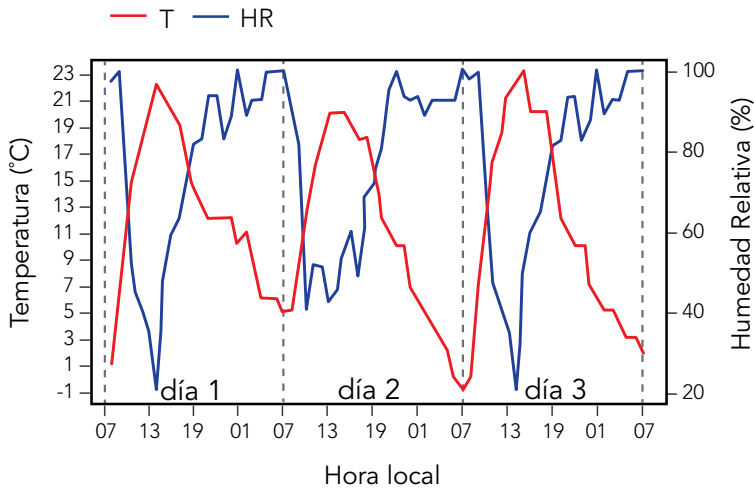


Figura 22. Temperatura vs. humedad relativa.

Fuente: elaboración propia.



La humedad es una variable meteorológica que afecta enormemente la operación de las aeronaves, especialmente en su fase de aproximación y despegue por estar estrechamente vinculada con fenómenos meteorológicos que producen baja visibilidad. Conceptos y casos prácticos de aplicación aeronáutica podrán ser consultados en el capítulo 11, correspondiente a peligros meteorológicos–baja visibilidad.





# Capítulo 4.

## El viento

---

4.1 Definición

4.2 Velocidad y dirección del viento

4.3 Circulación general de la atmósfera

4.4 Fuerzas que actúan sobre el aire en movimiento

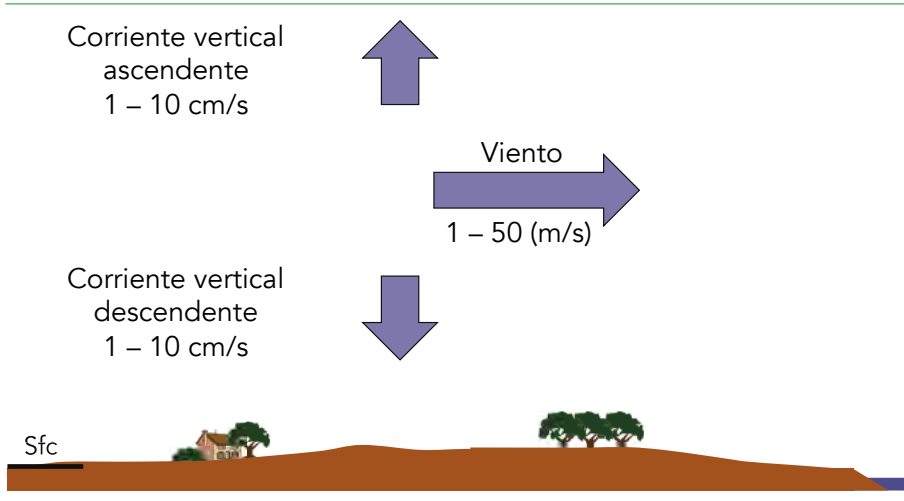
4.5 Barlovento y sotavento

4.6 Medición del viento



# 4.1 Definición

El viento es el movimiento de una masa de aire en sentido horizontal, el cual puede alcanzar velocidades superiores a 50 m/s. Cuando el desplazamiento se realiza en sentido vertical, toma el nombre de corriente *ascendente* o *descendente*, dependiendo de si el movimiento se genera desde o hacia la superficie (figura 23).



**Figura 23.** Diferencias entre viento y corriente.

**Fuente:** elaboración propia.

Las diferencias en el nombre se deben a que el movimiento del aire en sentido horizontal supera en dos órdenes de magnitud a los desplazamientos verticales, de los cuales solo unos pocos superan los 10 cm/s. Hay dos parámetros importantes relacionados con el viento: la velocidad y la dirección.

# 4.2 Velocidad y dirección del viento

La velocidad del viento está directamente influenciada por la temperatura: a mayor diferencia de temperatura, mayor velocidad del viento. Las unidades más utilizadas para medir la intensidad del viento son los metros por segundo (m/s), kilómetros por hora (km/h) y los nudos (kt), este último equivalente a ~0,5 m/s o ~1,85 km/h.



Normalmente, en Colombia los vientos son más fuertes de las 15:00 a las 19:00 horas y encuentran su mínimo a las 07:00 horas. Según el IDEAM (2005), la velocidad media anual en superficie alcanza en general valores inferiores a los 15 km/h.

El viento es causado por la diferencia de presiones; se desplaza desde zonas de alta a baja presión, las cuales se originan a su vez por las diferencias de temperaturas ya mencionadas. Se llama dirección del viento al punto cardinal de donde proviene el viento; los principales son el norte (N), sur (S), este (E) y oeste (W). Se consideran hasta 32 puntos cardinales, aunque los más usados se relacionan en la figura 24.

Sigla	Punto cardinal	Grados
N	Norte	0°
NNE	Nornoreste	22,50°
NE	Noreste	45,00°
ENE	Estenoreste	67,50°
E	Este	90,00°
ESE	Estesureste	112,50°
SE	Sureste	135,00°
SSE	Sursureste	157,00°
S	Sur	180,00°
SSW	Sursuroeste	202,50°
SW	Suroeste	225,00°
WSW	Oestesuroeste	247,50°
W	Oeste	270,00°
WNW	Oestenoroeste	292,50°
NW	Noroeste	315,00°
NNW	Nornoroeste	337,50°

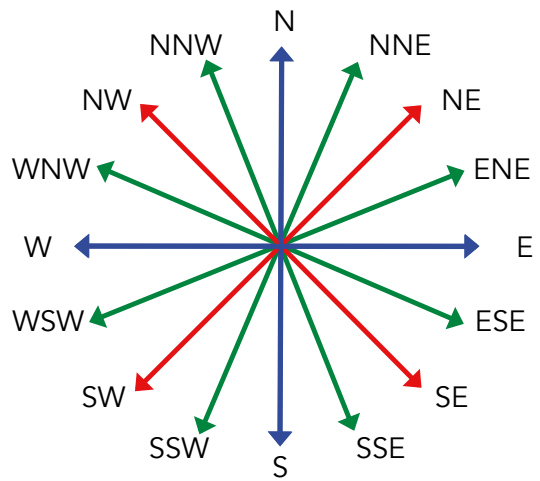


Figura 24. Puntos cardinales y rosa de vientos.

Fuente: elaboración propia.

## 4.3 Circulación general de la atmósfera

Desde el punto de vista de conservación de energía, la circulación general de la atmósfera es el resultado de la búsqueda de equilibrio debido a las diferencias de radiación solar con la latitud, a la rotación de la Tierra, y a la distribución particular de los continentes y los océanos. Está dividida en *circulación en superficie* y *en altura*.

La circulación general en superficie está definida de la siguiente manera:



- Una franja de viento en la zona tropical desplazándose del E al W. Allí, los vientos alisios del noreste chocan con los del sureste. El aire asciende, se enfría y se condensa, con lo cual se forman nubes de tormenta (*cumulonimbos*) a lo largo de toda la franja y se da lugar a la *Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT)*. León *et al.* (2000) presentan un detallado análisis de la influencia de la ZCIT en Colombia.
- Una franja de viento en la zona de las latitudes medias que se extiende, en promedio, desde 35° hasta los 65° de latitud, y que se desplaza del W al E conocida como *Vientos del oeste*.
- Una franja de viento en las zonas polares desplazándose del E al W, conocida como *Vientos polares del este*.

La circulación general en altura está principalmente definida por:

- Tres franjas de viento en dirección opuesta a sus contrapartes en superficie.
- Una corriente en chorro polar que se desplaza de W a E, asociado al frente polar y al viento cerca de la tropopausa, procedente de los polos y las latitudes medias.
- Una corriente en chorro subtropical que se desplaza de W a E, asociada a la conservación de momento angular y al viento en altura, procedente del ecuador y de las latitudes medias.

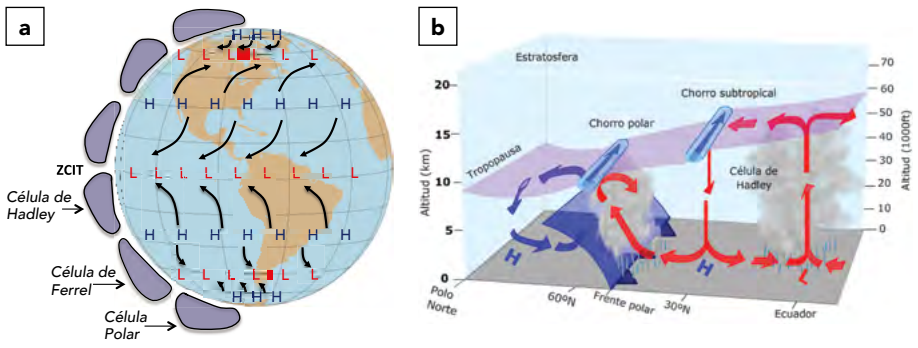
El viento en superficie y el viento en altura se vinculan en la dinámica de la atmósfera terrestre, la cual se realiza mediante lo que se ha denominado las celdas de Hadley, Ferrel y Polar (figura 25a y 25b). Estas celdas interactúan constantemente entre sí, principalmente por diferencias de temperatura y presión. El calentamiento en el ecuador eleva el aire y lo transporta hasta una región de alta presión en los trópicos. Allí, el aire desciende y se divide en dos partes; el aire que regresa al ecuador completa la celda de Hadley.

Al igual que la celda de Hadley, la celda polar se origina a partir de un gradiente de temperatura entre los polos y las latitudes medias. A unos 60° de latitud, el aire se eleva y fluye hacia los polos donde, a medida que se enfría, desciende hasta superficie y se devuelve hacia las latitudes medias.

El origen de la celda de Ferrel no es igual al de las celdas de Hadley y Polar. La segunda parte del aire ecuatorial que desciende en los trópicos se dirige hacia los polos y se encuentra con la celda Polar, lo cual origina el frente polar. El aire en estas zonas asciende y una parte regresa hacia los trópicos, lo que cierra la celda de Ferrel.

Las zonas de alta y baja presión mantienen una fuerte relación con la dirección del viento y el ascenso y descenso del aire. En la ZCIT y el frente polar, la presión es baja, el viento converge en superficie y asciende. En los trópicos y en los polos, la presión es alta, hay divergencia de los vientos en superficie y el aire desciende (figura 25a).





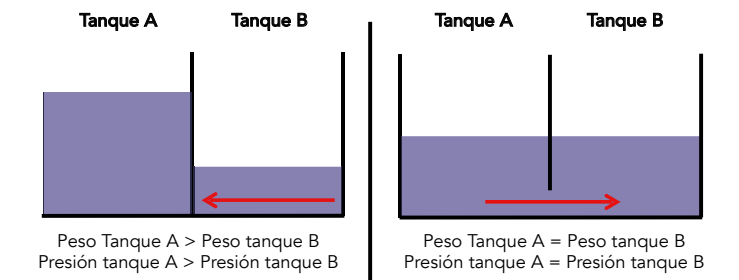
**Figura 25.** Circulación general de la atmósfera e interacción de las células de Hadley, Ferrel y Polar.  
**Fuente:** Figura 25b tomada de E-ducativa CATEDU (2016).

Las variaciones al comportamiento teórico de la circulación general de la atmósfera están provocadas por las diferencias de temperatura –que producen zonas de alta y baja presión–, por la rotación de la Tierra –la cual causa que el flujo del aire se desvíe a la izquierda en el hemisferio sur y a la derecha en el hemisferio norte (fuerza de Coriolis)–, la fuerza centrífuga y la fuerza de rozamiento con la superficie terrestre.

## 4.4 Fuerzas que actúan sobre el aire en movimiento

### 4.4.1 Gradiente de presión

Es la diferencia de presión que existe entre dos puntos. Ésta causa movimiento de las partículas de aire desde la zona de alta presión a la zona de baja presión. Tómese como ejemplo la figura 26, en la cual se muestran dos tanques llenos de agua y separados por una pared. Si se abriera un orificio en la pared, el agua del tanque con mayor peso por unidad de área se desplazaría hacia el tanque con menor peso, en búsqueda del punto de equilibrio.



**Figura 26.** Esquema del movimiento del aire por efecto de la presión. Columnas de agua.  
**Fuente:** elaboración propia.

### 4.4.2 Fuerza de Coriolis

Es la fuerza aparente que actúa sobre los cuerpos en movimiento a causa de la rotación de la Tierra y que es proporcional a la velocidad de la partícula. Coriolis tiende a desviar el viento hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. La figura 27a representa una hipótesis de la circulación general atmosférica sin esta fuerza, y la figura 27b representa la circulación del comportamiento de los vientos con ella, tal como se anota en el numeral 4.3. Esta fuerza tiene su valor máximo en los polos y su valor mínimo en el ecuador.

68

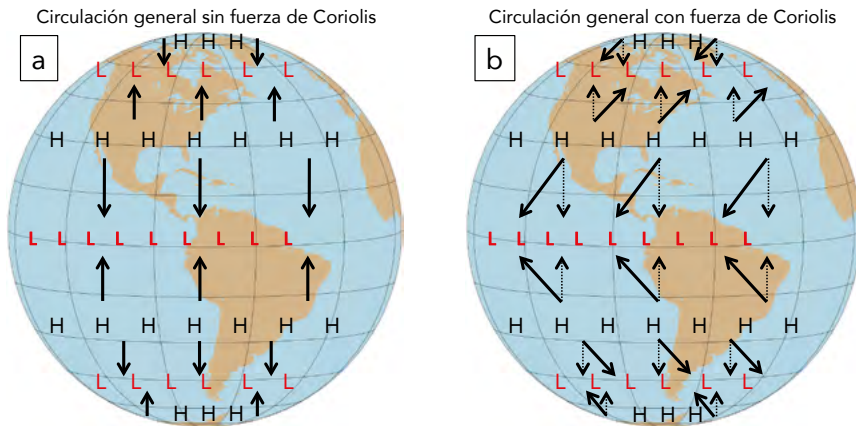


Figura 27. Influencia de la presión y fuerza de Coriolis en la circulación de la atmósfera. Fuente: elaboración propia.

### 4.4.3 Fuerza centrífuga

Debido a la velocidad angular ( $\Omega$ ), conocida comúnmente como la fuerza de rotación de la Tierra, se genera una fuerza centrífuga o inercia (contraria a la fuerza centrípeta), la cual produce una tendencia del aire a abultarse y acelerarse en el ecuador. La fuerza centrífuga contrarresta la gravedad real de la Tierra y causa que los cuerpos sobre la superficie se tornen más livianos. Cuanto más cerca del ecuador, mayor es la circunferencia que tienen que recorrer los cuerpos en 24 horas debido a que el radio latitudinal es mucho mayor y, en consecuencia, giran a mayor velocidad tangencial (figura 28).

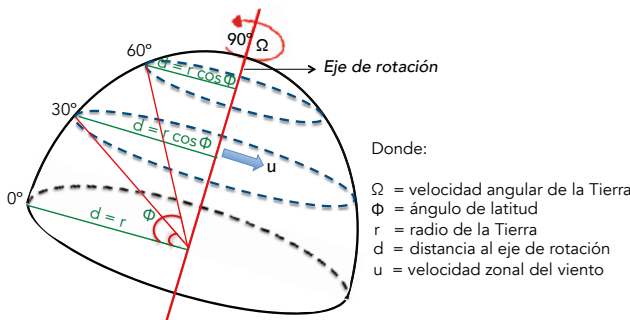


Figura 28. Velocidad de rotación de la tierra según la latitud. Fuente: elaboración propia.



Partiendo de un radio ecuatorial terrestre de 6374 km y considerando que  $\Omega$  no cambia, la velocidad relativa del viento zonal puede calcularse según la latitud  $\phi$ , lo que es lo mismo, a la distancia del eje de rotación. Para esto, se debe conocer que  $360^\circ = 2\pi$  radianes y por lo tanto  $1 \text{ rad} = 57,3^\circ$  o  $1^\circ = 0,01545 \text{ rad}$ . La velocidad angular ( $\Omega$ ) puede entonces calcularse como:

$$\Omega = \left( \frac{360^\circ}{24 \text{ h}} \right) \left( \frac{2\pi \text{ rad}}{360^\circ} \right) = \frac{2\pi 57,3^\circ}{24\text{h}} = \frac{15^\circ}{\text{h}} = \frac{15(0,01545)}{\text{h} (3600)} = \frac{7,27 \times 10^{-5} \text{ rad}}{\text{s}}$$

Al conocer la velocidad angular y recordar que la distancia al eje de rotación es igual al radio de la Tierra por el coseno de la latitud, podría fácilmente completarse la tabla 8.

Tabla 8. Velocidad zonal según la latitud.

Latitud	Velocidad angular (rad/s)	Distancia al eje (km)	Velocidad zonal (km/s)
0°	$7,27 \times 10^{-5}$	6 374	0,46
30°	$7,27 \times 10^{-5}$	5 520	0,40
60°	$7,27 \times 10^{-5}$	3 187	0,23

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.4 Fuerza de fricción

Es la fuerza que se opone al movimiento, la cual se produce por las imperfecciones del terreno (figura 29). Estas imperfecciones generan turbulencias fuertes que dificultan la operación de aeronaves, sobre todo en ángulos pronunciados (mayores a  $15^\circ$ ), en las que al aire se le imposibilita seguir los contornos de la superficie.

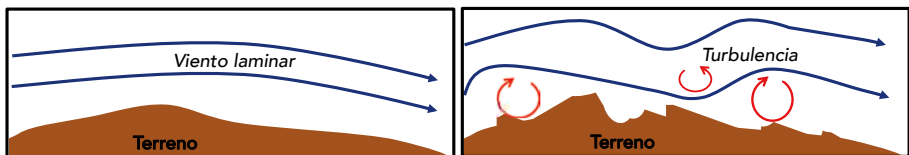


Figura 29. Viento laminar y turbulencia inducida por el terreno.

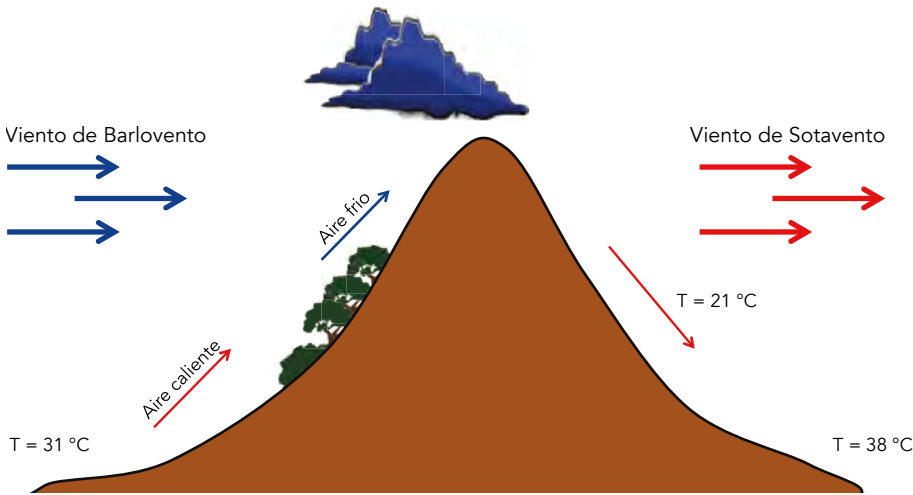
Fuente: elaboración propia.

En el viento turbulento, las partículas de aire se desplazan de forma desordenada con respecto a su dirección e intensidad. Como el aire puro es transparente, resulta imposible ver sus movimientos, lo cual provoca situaciones desagradables y peligrosas a las aeronaves que operen muy cerca al terreno. Para sortear este efecto, se debe evitar sobrevolar zonas montañosas, zonas con diferentes usos y tipos de suelo y zonas con altas diferencias de temperatura. En Colombia, las aeronaves están expuestas a este fenómeno por debajo de los 8 000 ft de altura, dependiendo de la zona geográfica donde se encuentre.

## 4.5 Barlovento y sotavento

70

El *barlovento* es la dirección desde donde sopla el viento. En relación con una montaña, cuando se habla de viento de barlovento, se hace referencia al viento presente en la cara de la montaña que primero lo recibe. Por lo general, se producen nubes orográficas causadas por el choque de las masas de aire contra el terreno, su ascenso, enfriamiento y posterior condensación (figura 30). Esa parte de la montaña suele contener mucha humedad, vegetación y lluvias.



**Figura 30.** Barlovento y sotavento.  
Fuente: elaboración propia.

Por su parte, el sotavento es el lugar hacia donde sopla el viento. Cuando se habla de viento de sotavento, se hace referencia al viento presente en la cara de la montaña por donde se aleja el viento. En esa parte de la montaña se producen corrientes descendentes y secas, la vegetación es muy pobre, y puede encontrarse turbulencia de moderada a fuerte producto de las ondas de montaña.

## 4.6 Medición del viento

El viento tiene velocidad y dirección. En los aeródromos, el viento se mide a 10 m de altura; es tan importante en aviación que es la única variable que se mide en las dos cabeceras de la pista. El sistema de la FAC se esquematiza en la figura 31, en la cual se observa que el controlador de tránsito aéreo tiene y usa tres medidas de viento:

**Viento instantáneo:** se mide directamente por el instrumento instalado en la cabecera de la pista. Se actualiza cada 15 segundos.

**Viento promedio últimos 2 minutos:** se utiliza para dar información a los pilotos que están próximos a realizar una maniobra de despegue o aterrizaje.



**Viento promedio últimos 10 minutos:** se incluye en los reportes aeronáuticos que el controlador genera de forma horaria.

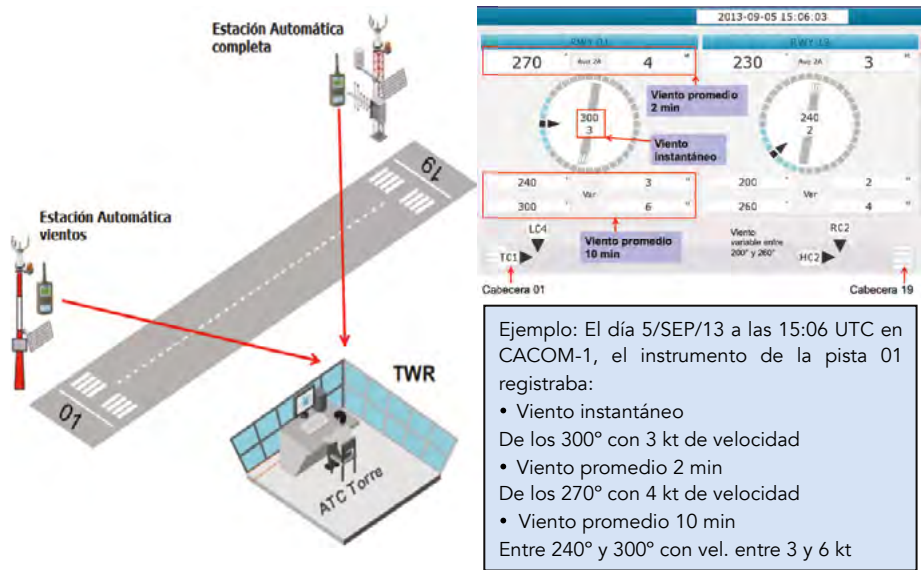


Figura 31. Software AVIMET de medición del viento en la FAC.

Fuente: elaboración propia.





# Capítulo 5.

## Presión atmosférica

---

- 5.1 Definición
- 5.2 Densidad del aire
- 5.3 Variaciones en la presión atmosférica
- 5.4 Principales formaciones isobáricas
- 5.5 Uso de la presión en aviación

# 5.1 Definición

La presión atmosférica es la fuerza que ejerce el peso de la atmósfera terrestre sobre cada unidad de superficie. La presión atmosférica sobre un punto se explica por el peso del aire que se encuentran sobre ese lugar específico desde superficie hasta el tope superior de la atmósfera. A medida que se gana altura, se superan las capas más bajas –que a su vez son bastante más densas–, de tal manera que la presión disminuye con la altura. Desde el punto de vista histórico, la primera unidad empleada para medir la presión atmosférica fue el *milímetro de mercurio* (mmHg). El experimento de Torricelli que demuestra la existencia de la presión atmosférica (figura 32) consiste en lograr equilibrar el peso de la columna de aire sobre un punto, con el peso de 760 mmHg, en condiciones de una Atmósfera Estándar Internacional (ISA).

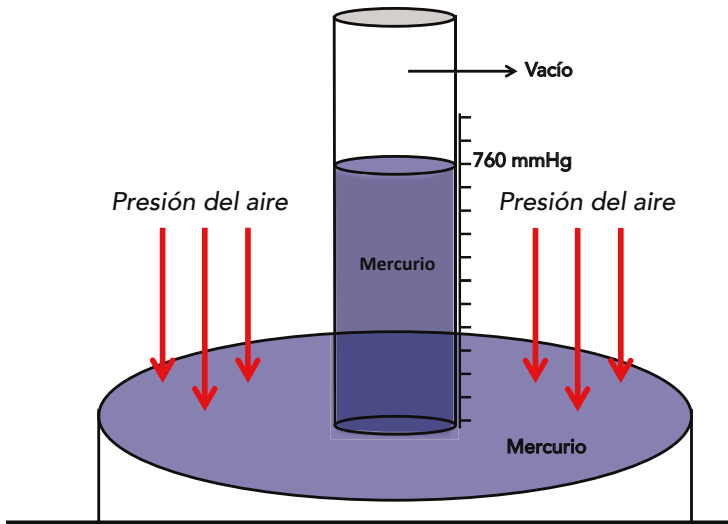


Figura 32. Experimento realizado por Torricelli.

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, para efectos prácticos, era más conveniente pasar una unidad de longitud (mmHg) a unidades de presión (mb), utilizando las siguientes fórmulas:

- 1  $V = A h$
- 2  $M = \rho V$
- 3  $F = M a$
- 4  $P = F / S$

Donde:

V = volumen	M = masa	P = presión
A = área	$\rho$ = densidad	S = superficie
h = altura	F = fuerza	a = gravedad



Al considerar la densidad del mercurio ( $13\,595,1\text{ kg} / \text{m}^3$ ) y aceleración debida a la gravedad ( $9,80665\text{ m} / \text{s}^2$ ), las unidades de longitud se convirtieron en unidades de presión, así:

$V = 0,0001\text{ m}^2\ (0,76\text{ m})$	$F = 1,0332276\text{ kg}\ (9,80665\text{ m} / \text{s}^2)$
$V = 0,000076\text{ m}^3$	$F = 10,1325\text{ N}$
$M = \rho V$	$P = 10,1325\text{ N} / \text{m}^2$
$M = 13\,595,1\text{ kg} / \text{m}^3\ (0,000076\text{ m}^3)$	$P = 10,1325\text{ N} / 0,0001\text{ cm}^2$
$M = 1,0332276\text{ kg}$	$P = 10,1325\text{ Pa}$
	$P = 1012,25\text{ hPa o mb}$

75

En Colombia, específicamente en el campo de la meteorología y la aviación, se utiliza la milésima de bar, el *milibar* (mb), el cual es equivalente a 1 000 *barias*, unidad de presión en el Sistema Cegesimal de Unidades (CGS). También es usual utilizar los *hectopascales* (hPa) en meteorología y las *pulgadas de mercurio* ("Hg) en el mundo aeronáutico.

## 5.2 Densidad del aire

La densidad es la relación existente entre la masa de cualquier sustancia y el volumen que ocupa. Normalmente, está expresada en  $\text{kg} / \text{m}^3$ . En el caso del aire, su densidad se afecta directamente por los cambios de presión y temperatura causados por las variaciones de altura.

De la ecuación de estado relacionada en el capítulo 2,  $\rho = P / RT$ , se deduce que la densidad aumenta o disminuye en relación directa con la presión e inversa con la temperatura. Si al aumentar la altura, la presión y la temperatura disminuyen pero causan con su comportamiento una reducción e incremento simultaneo sobre la densidad, ¿la densidad aumenta o disminuye con la altura? La respuesta es sencilla: la densidad disminuye con la altura, los cambios de presión influyen en mayor medida que los cambios de temperatura. La densidad afecta la sustentación, la resistencia y el rendimiento general de la aeronave.

## 5.3 Variaciones en la presión atmosférica

La presión atmosférica varía esencialmente por tres factores: la temperatura, la altura y la posición en la tierra.

### 5.3.1 Temperatura

Como se explicaba en el capítulo 2, el aire no se calienta igual en todos los sitios de la Tierra y las fuertes diferencias de temperatura causan diferencias de presiones. Cuando



una masa de aire se calienta, sus moléculas se agitan, se separan, y el conjunto se vuelve menos denso. Por ello, un mismo volumen pesará menos y presionará menos contra el suelo.

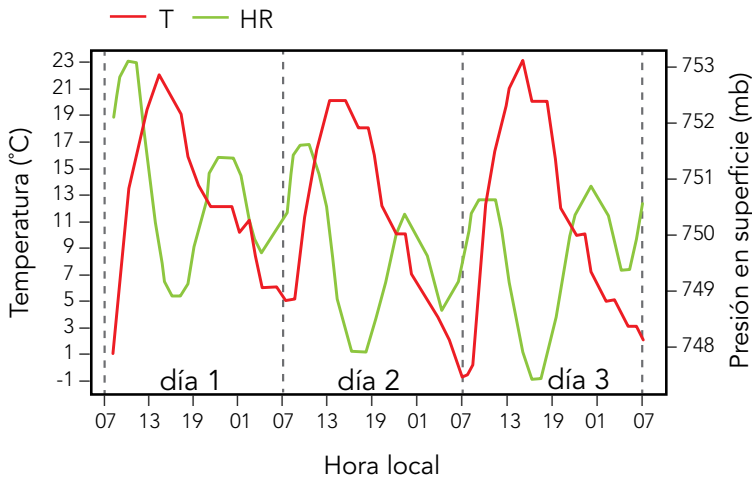
El aire cálido –que es poco denso y pesa menos que el frío– forma en superficie una zona de baja presión y tiende a ascender. Al ascender, arrastra el vapor de agua que contiene, el cual se expande, se enfría y se condensa, formando nubes.

76

Por su parte, el aire frío es más denso y pesado: sus moléculas se acercan y tiende a descender, formando en superficie zonas de alta presión que inhiben las corrientes ascendentes, con lo cual se evita la formación de nubes.

En Colombia, las principales diferencias de temperatura se producen por la variación diaria de las horas de sol, lo cual hace que la presión atmosférica varíe muy poco y se ajuste a dos máximos y dos mínimos en el día, influenciada por el comportamiento de la temperatura.

La figura 33 muestra el comportamiento horario de estas dos variables utilizando el mismo aeródromo, periodo y datos de temperatura de la figura 22. En esta ocasión, no obstante, se contrastan con los datos de presión atmosférica en superficie.



**Figura 33.** Temperatura vs. presión atmosférica horaria en Bogotá durante los tres primeros días de enero de 2010.

**Fuente:** elaboración propia.

### 5.3.2 Altura

La presión atmosférica disminuye con la altura. La disminución que experimenta la presión con la altura no es lineal; el aire es un fluido que puede comprimirse mucho, por lo que las masas de aire más próximas al suelo están comprimidas por el propio peso del aire de las capas superiores y son, por tanto, mucho más densas. Así, cerca del nivel del mar, un pequeño ascenso en altura causa una gran disminución de la presión, mientras que a gran altura hay que ascender mucho más para que la presión disminuya en la misma medida.



Como la presión atmosférica depende del peso del aire sobre un cierto punto de la superficie terrestre, cuanto más alto esté el punto, tanto menor será la presión, pues también es menor la cantidad de aire que hay sobre el punto.

La figura 34 muestra la escala de disminución de la presión con la altura en la tropósfera, donde se disminuye 1 mb por cada 9 m de altura (30 ft), o 1 "Hg por cada 1 000 ft. Si se requiere pasar mb a "Hg, se dividen los milibares entre 33,86 (factor de conversión). 33,86 es el resultado de dividir las dos presiones estándar 1013 mb y 22,92 "Hg. Sin embargo, este es un cálculo rápido que las tripulaciones deberán usar solo en tareas menores que no comprometan la seguridad del vuelo.

77

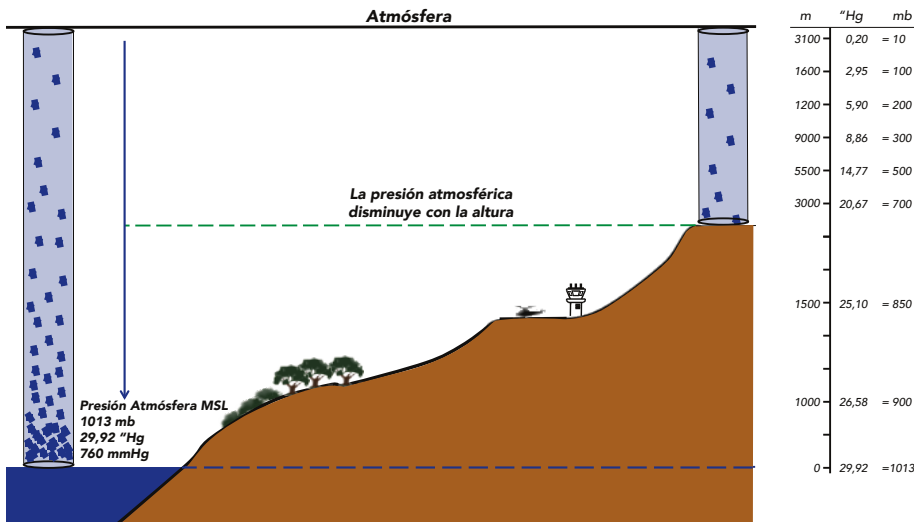


Figura 34. Comportamiento de la presión vs. altura.

Fuente: elaboración propia.

La siguiente ecuación, deducida de la ecuación de estado y de la ecuación hidrostática (Wallace & Hobbs, 2006), estima la presión atmosférica de un sitio ubicado a una altura z.

$$P = 1013 \left( \frac{288 - 0,0065 z}{288} \right)^{5,26}$$

Donde:

P = Presión atmosférica en la altura z (milibares)

z = Altura en metros

288 = Temperatura en °K (°K = 15 °C + 273)

0,0065 = Gradiente medio de temperatura (0,0065 °C / m)

1013 = Presión atmosférica estándar en superficie (mb), podría utilizarse 29,92 "Hg para conocer el resultado en "Hg.

Ejemplo: Calcule la presión atmosférica para una altura de 3 000 m.



$P = 1\,013 \left( \frac{288 - 0,0065 (3000)}{288} \right)^{5,26}$	$P = 29,92 \left( \frac{288 - 0,0065 (3000)}{288} \right)^{5,26}$
Respuesta: 700 mb	Respuesta: 20,67 "Hg

Estas aproximaciones se realizan bajo condiciones atmosféricas estándar; normalmente, varían según la temperatura en superficie, el gradiente de temperatura y la latitud.

78 **Reducción de la presión por la altura**

Una pregunta frecuente de los aviadores colombianos es: *si Bogotá está a 2 600 m de elevación y la presión disminuye con la altura, por qué el QNH del aeropuerto oscila alrededor de 30,37 "Hg, mientras que el de Cartagena fluctúa alrededor de los 29,92 Hg?*

La respuesta es que el QNH hace referencia a la presión altimétrica reducida o ajustada al nivel medio del mar. Es la presión atmosférica de Bogotá como si no existieran los 2 600 m de elevación que la caracterizan y hubiera que sumarle la presión que ejerce el peso de esa columna de aire (2 600 m) para –imaginariamente– colocar el aeropuerto al nivel del mar. En otras palabras, el QNH indica la presión atmosférica que tendría Bogotá si el aeropuerto se encontrara al nivel medio del mar.

Ahora bien, la presión atmosférica real de Bogotá varía alrededor de los 22,15 "Hg; sin embargo, las torres de control nunca dan a las tripulaciones presión atmosférica, pues en aeronáutica se trabaja únicamente con presión altimétrica.

La figura 35 presenta un ejemplo de los datos de presión atmosférica y altimétrica en Bogotá del 17 al 19 de marzo de 2014. En ella, puede observarse claramente la diferencia que existe entre las dos variables.

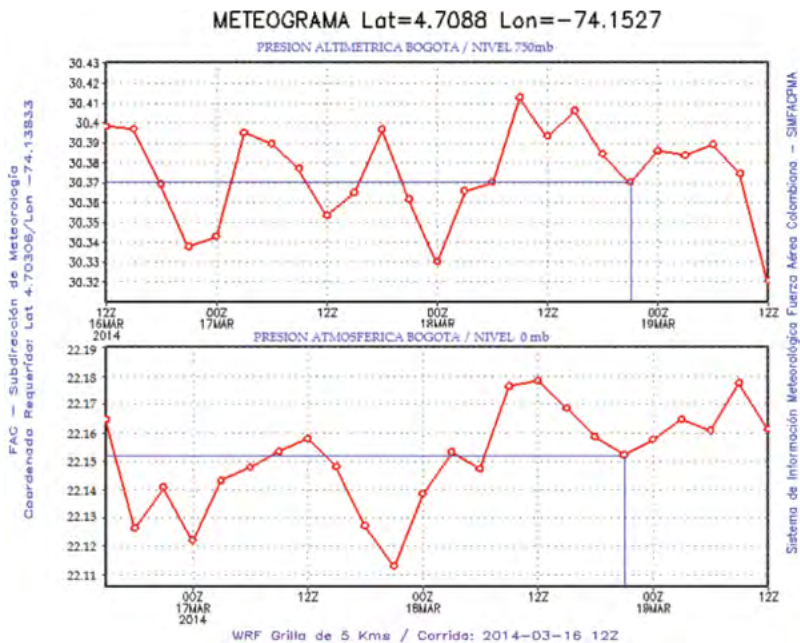


Figura 35. Diferencias entre presión altimétrica y atmosférica en Bogotá.

Fuente: Tomado de SIMFAC (s.f.).



La presión atmosférica es la presión medida directamente por un barómetro. Se reduce la presión atmosférica al nivel medio del mar para poder comparar aeropuertos con diferentes elevaciones. Cuando se comparan todos los aeropuertos, como si las montañas no existieran y todos estuvieran ubicados justo sobre el nivel medio del mar, la presión atmosférica pasa a ser presión altimétrica, reducida o ajustada al nivel medio del mar. Normalmente, se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{msl} = \frac{P_{sfc}}{\exp\left(-\frac{gz}{RT_m}\right)}$$

Usando propiedades de  $\exp^{11}$ , donde  $\exp(x) = \frac{1}{\exp(-x)}$ . La anterior ecuación también puede escribirse como:

$$P_{msl} = P_{sfc} \left[ \text{EXP}\left(\frac{gz}{RT_m}\right) \right]$$

Donde:

$P_{msl}$  = QNH, o presión reducida a nivel del mar

$P_{sfc}$  = QFE, o presión atmosférica de superficie medida en la estación por un barómetro

$g$  = aceleración de la gravedad ( $9,80617 \text{ m} / \text{s}^2$ )

$R$  = constante de los gases ( $287,04 \text{ m}^2 / \text{s}^2 \text{ K}$ )

$z$  = elevación de la estación (en metros)

$T_m$  = temperatura media =  $T_k - \left(\frac{0,0065 z}{2}\right)$

$T_k$  = temperatura en superficie (°K)

Suponiendo que se desea comparar la presión altimétrica registrada en dos ciudades diferentes, debe reducirse la presión en cada una de ellas. De manera analítica y gráfica, en el siguiente ejemplo (figura 36) se muestra cómo se reducen las presiones de las ciudades de Cúcuta (a 300 m sobre el nivel del mar) y Bogotá (2 600 m sobre el nivel del mar), con el único fin de poder comparar las diferencias de presión entre las dos ciudades sin que el resultado sea influenciado por el terreno (elevación).

Cúcuta	Bogotá
Temperatura (sfc) = 25 °C = 298 °K	Temperatura (sfc) = 15 °C = 288 °K
Elevación (z) = 300 m	Elevación (z) = 2600 m
$P_2 = 28,95 \text{ "Hg}$	$P_2 = 22,15 \text{ "Hg}$
$P_{msl} = (P_{sfc}) \text{ Exp } \frac{0,034 z}{T_m}$	$P_{msl} = (P_{sfc}) \text{ Exp } \frac{0,034 z}{T_m}$
$P_{msl} = (P_{sfc}) \text{ Exp } \frac{0,034 (300)}{297,025}$	$P_{msl} = (P_{sfc}) \text{ Exp } \frac{0,034 (2600)}{297,55}$
$P_{msl} = (28,95) (0,0343)$	$P_{msl} = (22,15) (0,031)$
$P_{msl} = 29,25$	$P_{msl} = 30,38$

11 EXP es la función exponencial e, el cual se trata de un número irracional; tiene infinitas cifras decimales y no es periódico. Su valor es 2,718281 (...) en sus seis primeras cifras decimales. La función exponencial que tiene por base el número e se escribe como  $y = \exp(x)$ . Esto significa que y es igual a e elevado a la potencia x.





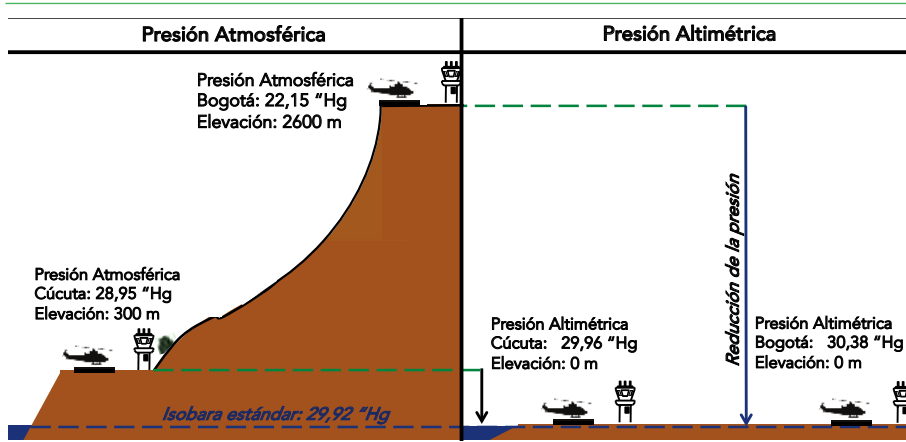


Figura 36. Reducción de la presión eliminando la elevación del punto.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la demostración anterior nos indican que, sobre el área donde se encuentra ubicada Bogotá, hay mayor presión atmosférica (alta) que sobre el área del aeropuerto de Cúcuta (baja).

Para el estudio de las condiciones meteorológicas en un área amplia, es muy útil comparar las presiones simultáneas en diversos puntos de dicha área. La comparación no puede hacerse directamente porque los valores de la presión están poderosamente influenciados por la elevación de cada lugar. Un mapa de este tipo sólo permitiría ver terrenos altos y llanos –es decir, valores de presión atmosférica–, sin dar ningún indicio de dónde pueden encontrarse malas condiciones atmosféricas.

Al reducir las presiones atmosféricas al nivel del mar y graficar isobaras (líneas imaginarias que unen puntos de igual presión) sobre un mapa, pueden detectarse áreas de presión alta y baja, así como sus variaciones en el tiempo. De esta manera, se facilita la asociación de presión baja a mal tiempo y de presión alta a buen tiempo.

### 5.3.3 Posición en la Tierra

La altura de tropósfera varía entre 9 y 20 km según su ubicación en el ecuador o los polos, respectivamente. Esta desigualdad en la masa de aire ejerce diferente peso sobre los puntos de la Tierra según corresponda su latitud y, por lo tanto, diferente presión atmosférica. Teniendo en cuenta lo anterior, el experimento de Torricelli en una atmósfera ISA fue realizado a los 45° de latitud, punto medio entre el ecuador y los polos.



# 5.4 Principales formaciones isobáricas

Las principales formaciones isobáricas (figura 37) son:

**Baja presión:** sistema atmosférico donde la presión más baja está concentrada en el centro del patrón; se asocia a inestabilidad atmosférica y mal tiempo. Se denota con una "B" (o "L", en inglés) en el centro del sistema. Este tipo de formación isobárica también es conocido como ciclón. Aunque *ciclón* y *anticiclón* en realidad se asocian a la dirección de la rotación del viento en un sistema de circulación cerrado, en la práctica terminan usándose de forma indistinta.

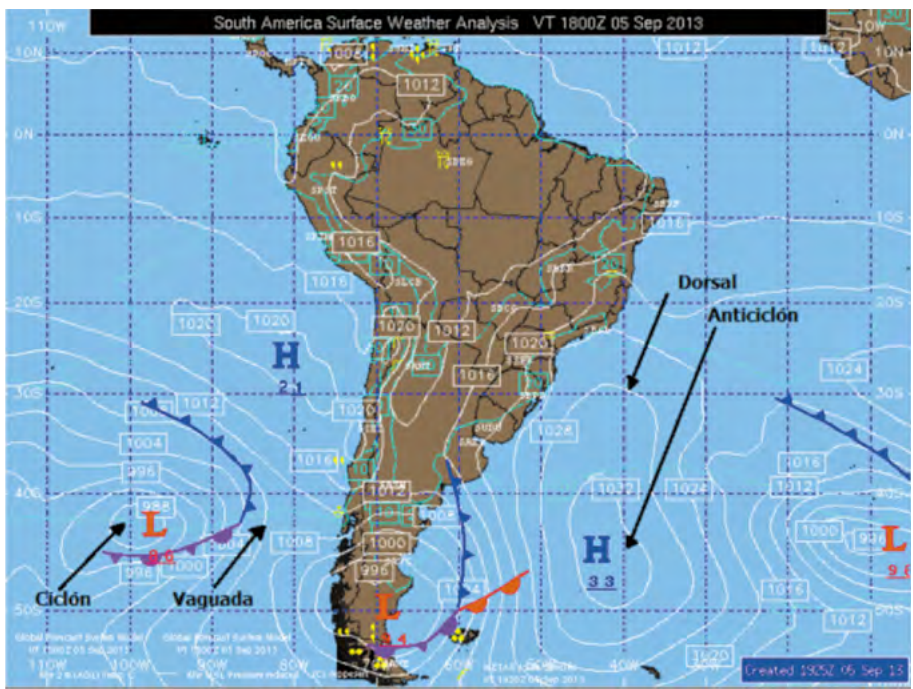


Figura 37. Formaciones isobáricas.  
Fuente: Modificado de JetPlan (s.f).

**Alta presión:** zona de alta presión donde la presión más alta se encuentra en el centro del patrón. Se le representa con la letra A (o H en inglés). En esta zona, la estabilidad atmosférica es alta puesto que el movimiento del aire es descendente, lo cual evita la formación de nubosidad.

**Vaguada (surco):** en los mapas de superficie se puede ver cómo, a partir del centro de una baja presión, las isobaras se deforman y alejan más del centro de un lado que en cualquier otra dirección. Este fenómeno se asocia usualmente a mal tiempo.



**Dorsal (cuña):** es un área elongada, de presión atmosférica relativamente alta, donde a partir del centro de una alta presión las isobaras se deforman y alejan más del centro de un lado que en cualquier otra dirección. Este fenómeno generalmente se asocia a buen tiempo dada su baja humedad (más información referente a formaciones isobáricas puede encontrarse en el capítulo 14).

## 5.5 Uso de la presión en aviación

---

La presión es la variable atmosférica más utilizada por las aeronaves. La diferencia de presión entre dos puntos permite medir distancias verticales en forma indirecta. En aviación se emplean los altímetros, instrumentos que miden las diferencias de presiones entre un nivel de referencia y el medido por el instrumento a bordo de la aeronave, convirtiéndolos en valores aproximados de altitud.

Los servicios de tránsito aéreo (ATS) transmiten a los pilotos la presión de referencia a través del código Q, una colección estandarizada de mensajes de tres letras con información requerida para el desarrollo seguro del vuelo. Estos son: nivel de vuelo (QNE), altura (QFE) y altitud (QNH). Más información puede consultarse en el capítulo 6 sobre altimetría.

Los instrumentos basados en la medición o cambios de presión del aire son:

- Velocímetro, anemómetro o indicador de velocidad.
- Altímetro, o indicador de altura.
- Variómetro, o indicador del régimen de cambio de altura, en ascenso o descenso.

Las mediciones se realizan con el tubo *Pitot* y las tomas o medidores de presión estática. Estos instrumentos son capaces de proporcionar información del movimiento del avión en la masa de aire. Su principal función es proporcionar al piloto la información necesaria para mantener la aeronave estable y desarrollar el vuelo de forma segura.



# Capítulo 6.

# Altimetría

---

6.1 Altimetro

6.2 Presiones referenciales

6.3 Ejemplo práctico de altimetría

# 6.1 Altímetro

El altímetro es el instrumento que determina la distancia vertical de la aeronave con respecto a un nivel de referencia fijo. Aunque hay altímetros de varias clases, la mayoría están basados en las diferencias de presión vertical que se presentan en los distintos niveles de la atmósfera. En 1648, Blas Pascal estableció por primera vez la posibilidad de utilizar las variaciones de presión tomadas del barómetro de Torricelli con el fin de medir diferencias de altura. El posterior invento del barómetro aneroide por Lucien Vidie permitiría en 1930 el diseño de los primeros altímetros con fines aeronáuticos.

Como se especificará más adelante, el altímetro compara las diferencias de presión entre la capa de aire que sobrevuela y un nivel de referencia, y traduce tales datos en términos de distancia vertical y entendibles para la tripulación: altura, altitud y nivel de vuelo de la aeronave.

Los altímetros normalmente están duplicados –uno para el piloto y otro para el copiloto– y sus características pueden variar (figura 38). En el caso del C-130, esta aeronave cuenta con tres altímetros: el altímetro del piloto, el cual muestra la presión en pulgadas de mercurio (29,80) y en milibares (1009), mientras que el altímetro del copiloto y del navegante<sup>12</sup> solo tiene la opción de pulgadas de mercurio. La altitud se muestra en una ventanilla compuesta por dos secciones: la primera sección corresponde a los miles de pies, y la segunda a cientos de pies. La misma altitud es registrada por la única aguja con la que cuenta este instrumento. En el ejemplo mostrado en la figura 38b, la aguja indica 1 640 ft.



**Figura 38.** Tipos de altímetro.  
Fuente: elaboración propia.

El helicóptero Arpía FAC 4135 tiene un altímetro que envía señales de altura al transpondedor. Tiene la capacidad de medir distancias entre -1 000 y 50 000 ft; la primera ventana de la izquierda mide la distancia vertical en miles de pies y la segunda en cientos

<sup>12</sup> Parte de la tripulación que tiene como función principal definir las rutas, altitudes y procedimientos para realizar un vuelo óptimo y seguro.



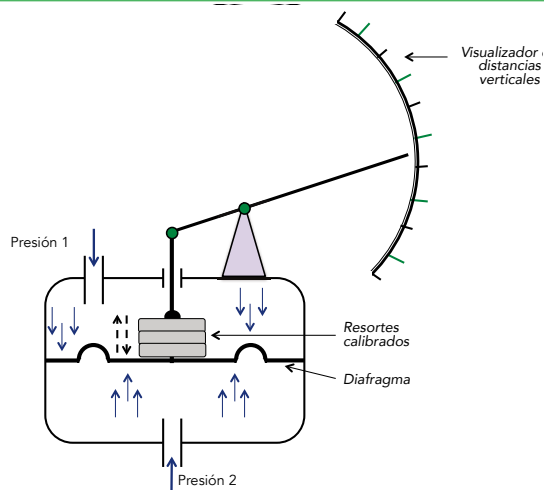
de pies, señalando así la misma cantidad que muestra la única aguja con la que cuenta este instrumento. En el caso de la figura 38a, el altímetro del Arpía indica 3 120 ft.

A diferencia de las otras aeronaves, el altímetro del Kfir posee dos sistemas de navegación. En este caso, se muestra el *Backup Flight Instrument* (BFI), que permite que el piloto interactúe con el instrumento al ajustar la presión de referencia, la cual se visualiza en pulgadas de mercurio (29,84) y en milibares (1011). El caso de ejemplo muestra 500 ft; esta casilla se va incrementando hasta la altura real en la que se encuentra el piloto, y puede llegar a más de 50 000 ft.

### 6.1.1 Diseño básico del altímetro

Por intermedio de las tomas estáticas, el altímetro mide la presión atmosférica de la capa de aire y la compara con la presión o nivel de referencia entregada a los pilotos por parte de los controladores aéreos, para luego traducir esta medida en términos de distancia vertical. Su funcionamiento está basado en la estrecha relación entre las diferencias de presión que existen a diferentes alturas. La calibración de su escala está hecha bajo condiciones de atmósfera estándar y, en consecuencia, sólo indicará valores reales cuando se den estas condiciones.

La diferencia entre estas dos presiones es medida por el *diafragma* y provoca un movimiento mecánico conectado a un sistema de relojería (figura 39). Dicho sistema transforma unidades de presión a unidades de fácil interpretación para el piloto (unidades de distancia vertical), sin olvidar que esa distancia está directamente relacionada a la presión de referencia calada por el piloto en el altímetro.



**Figura 39.** Esquema simple del funcionamiento del altímetro.

**Fuente:** elaboración propia.

El altímetro no es el único instrumento de vuelo que requiere datos de presión para su funcionamiento. Junto con el *anemómetro* o *velocímetro* (indicador de velocidad horizontal) y el *variómetro* (indicador de velocidad vertical), están conectados a las mismas tomas estáticas que permiten la entrada de aire al sistema de medición de cada instrumento. La presión externa disminuye o aumenta según la aeronave ascienda o descienda, de tal

manera que el altímetro y el variómetro traducen estos cambios de presión en altitud y velocidad de ascenso o de descenso.

El velocímetro es el único de los tres instrumentos que requiere la presión dinámica y estática para su funcionamiento. Basado en el principio de Bernoulli, transforma la diferencia entre la presión estática y la presión dinámica del aire en unidades de velocidad.

86

El sistema Pitot de toda aeronave (figura 40) se compone por el tubo Pitot y las tomas estáticas. Mientras que el tubo Pitot mide la presión de impacto –pues al estar directamente enfrentado al viento relativo depende de la velocidad del flujo de aire–, las tomas estáticas están ubicadas de forma perpendicular al flujo y son totalmente independientes de cualquier otra variable.

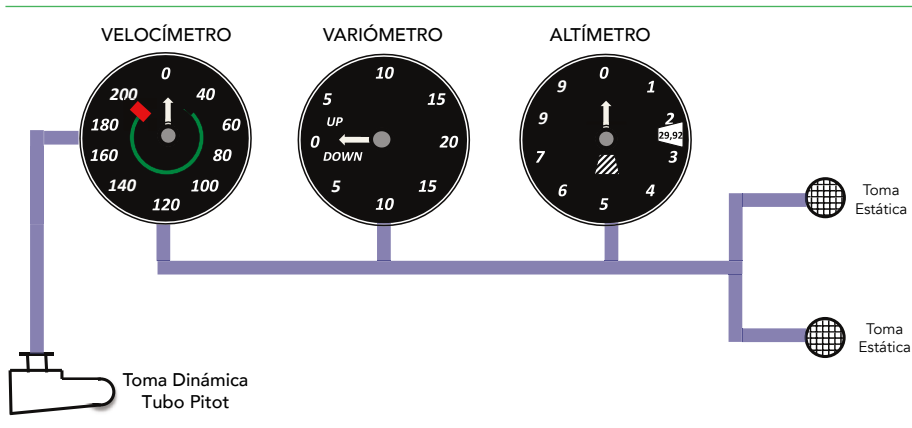


Figura 40. Instrumentos que funcionan con la presión atmosférica.

Fuente: elaboración propia.

### 6.1.2 Errores del altímetro

- **Error de escala:** se presenta cuando el altímetro no representa correctamente la relación entre presión y altitud, sobrepasando los límites de tolerancia.
- **Error mecánico:** se identifica porque, en superficie, la diferencia de presiones entre la toma estática de la aeronave y el QNH de referencia reportado por la torre de control debe corresponder en términos de distancia a la elevación del aeródromo. Si esta diferencia es superior a 75 ft, la misión debe cancelarse.
- **Error de fricción:** se causa por el roce entre las piezas móviles del mecanismo al exponerse a ciertos niveles de vibración, con un régimen de disminución de la presión de aproximadamente 750 ft por minuto.
- **Error de histéresis:** causado por la deformación del material después de vuelos largos a grandes alturas. Es como un acostumbramiento de la cápsula aneroide a su nueva posición, que retarda el cambio de la indicación.

Mediante la enmienda de mantenimiento al RAC 43 implementado en UAEAC (2016), el Reglamento Aeronáutico Colombiano (RAC) contempla la realización de varios tipos de pruebas a los altímetros con el fin de detectar estos y otros errores.



## 6.2 Presiones referenciales

Las presiones de referencia (figura 41) son, como su nombre lo indica, una referencia a cierto nivel de presión dado sin tener en cuenta las variaciones reales de la temperatura y considerando una atmósfera estándar. El piloto necesita las presiones de referencia para calcular distancias verticales. Las tres más utilizadas en aviación son:

87

**QNH.** Presión atmosférica que se está presentando en ese momento al nivel medio del mar. En otras palabras, es la presión atmosférica que tendría el aeródromo si estuviera ubicado en la misma posición geográfica, pero a nivel del mar. Se calcula por los instrumentos meteorológicos de los ATS, partiendo del dato de presión atmosférica del aeródromo. Las cartas de navegación y aproximación a los aeródromos están basadas en este nivel de referencia; por ello, todos los pilotos deben solicitar el QNH al despegar o aterrizar. En tierra y usando QNH, el altímetro debe indicar la elevación real del aeródromo; el piloto debe aceptar un error máximo de 75 ft, tal cual como se indicaba anteriormente en el error mecánico del altímetro. A la distancia entre la presión registrada por las tomas estáticas y la presión QNH se le denomina *altitud*.

**QNE.** A diferencia del QNH, que varía de un punto a otro, el QNE es constante, es conocido como la isobara<sup>13</sup> estándar a nivel medio del mar y su valor siempre será 29,92 "Hg o 1013 mb. Generalmente es usada en sitios donde las aeronaves no tienen control ATS, en los largos vuelos internacionales y por encima de cierta altitud. Cuando una aeronave vuela ajustada a la presión de referencia QNE se dice que se encuentra en un FL (Flight Level), siempre expresado en centenares de pies. De acuerdo a lo anterior, el *nivel de vuelo* es la distancia vertical de la aeronave a la isobara estándar 29,92 "Hg.

**QFE.** Es la presión atmosférica medida directamente en el aeródromo. Su uso normalmente se limita a vuelos acrobáticos donde el altímetro debería indicar 0 ft al despegar o aterrizar, ya que la presión de la toma estática de la aeronave y la del aeródromo es la misma. A la distancia vertical entre la aeronave y el QFE se le denomina *altura* y siempre se expresa en pies AGL (*above ground level*) o ASFC (*above surface*).

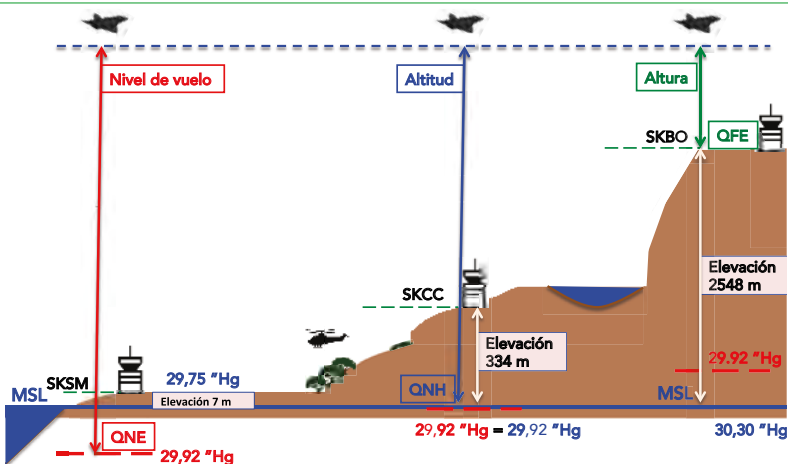


Figura 41. Presiones referenciales.

Fuente: elaboración propia.

13 Línea imaginaria que une puntos con igual presión atmosférica.





Otro término utilizado para definir distancias verticales es la elevación, aunque nada tiene que ver con aviación. La elevación indica la distancia vertical entre el nivel medio del mar y un punto en la superficie terrestre.

### 6.2.1 Calaje del altímetro

88 Los reglamentos aeronáuticos establecen que todas las aeronaves deben volar con la misma presión de referencia, caladas<sup>14</sup> con QNH si están en un radio de 150 km con el aeródromo más cercano, y con QNE si no disponen de información QNH o se encuentran por encima de 18 000 ft. Este procedimiento garantiza que los cambios de presión atmosférica influirán por igual a todas las aeronaves, manteniendo entre ellas una altura de separación segura.

Cuando se está en ascenso, el piloto puede llegar a la denominada *altitud de transición* (figura 42), la cual marca la transición o cambio entre el uso de altitudes (calando QNH en el altímetro) y el uso de niveles de vuelo (calando QNE). Situación contraria ocurre cuando se está en descenso y se abandonan los niveles de vuelo, se cruza el *nivel de transición* y se cala el altímetro en QNH nuevamente.

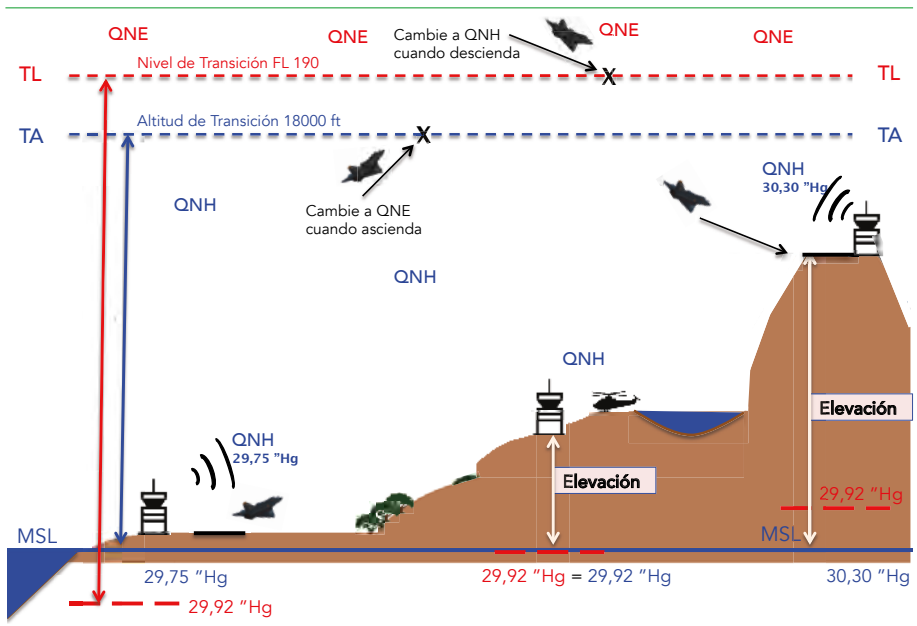


Figura 42. Altitud y nivel de transición.

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a lo anterior, la regulación entre el uso de QNH y QFE está definida por:

**Altitud de Transición (TA).** La TA es la altitud máxima por debajo de la cual los pilotos están obligados a realizar el ajuste del QNH (ajuste del altímetro de acuerdo a las condiciones atmosféricas locales). La TA puede variar según las características topográficas de cada país; en Colombia, la TA es de 18 000 ft.

14 Término para referirse al uso de un nivel de referencia. También puede utilizarse el término de ajuste altimétrico o presión de referencia.



**Nivel de Transición (TL).** El TL es el nivel de vuelo mínimo por encima del cual las tripulaciones están obligadas a realizar el ajuste del QNE (ajuste del altímetro basado en la isobara estándar de 29,92 "Hg). El TL siempre estará por encima de la TA, separado a una altura segura. En Colombia, el primer nivel de vuelo es el FL 190.

**Capa de Transición.** Es el espacio existente entre la TA y el TL, el cual puede variar desde cero pies hasta la máxima diferencia entre la isobara del nivel medio del mar y la isobara estándar 29,92 "Hg. Para garantizar una altura de transición segura, la última TA autorizada en Colombia es de 18 000 ft, y el primer FL corresponde al FL 190.

A continuación se presenta un ejemplo de cómo la TA puede variar de acuerdo a las condiciones atmosféricas presentes en el aeródromo. En la parte izquierda de la figura 44, el QNH es 29,75 "Hg y el ajuste estándar 29,92 "Hg, para una diferencia de 0,17 "Hg, los cuales se convierten en 170 ft. El primer FL disponible por encima de 18 000 ft es FL 190 (19 000 ft). Como la isobara de 29,92 está por debajo del nivel medio del mar, los 170 ft de diferencia se restan a los 1000 ft de la capa de transición normal, lo cual garantiza una separación de 830 ft entre la última altitud de transición y el primer nivel de vuelo disponible.

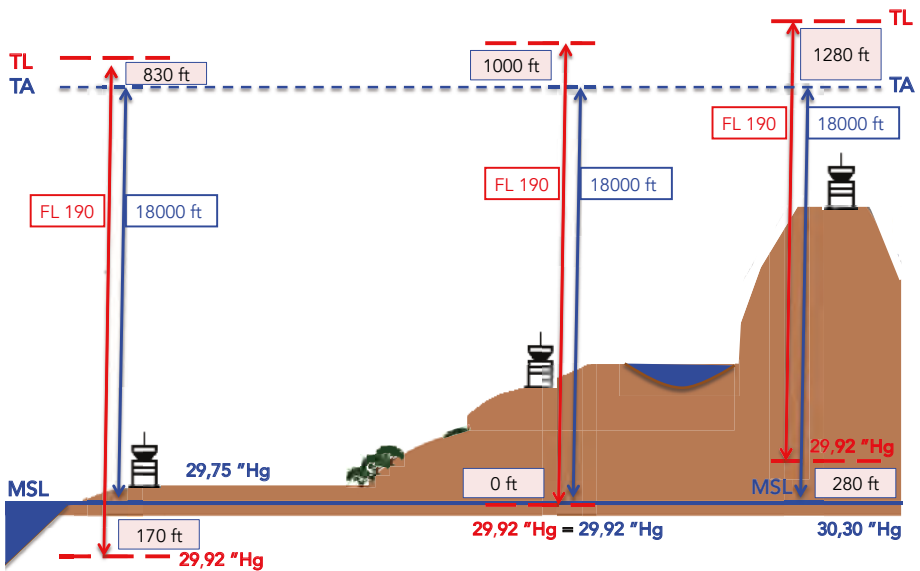


Figura 43. Cambios en el nivel de transición.  
Fuente: elaboración propia.

En la parte central, el QNH es 29,92 "Hg, por lo que no hay diferencia con el ajuste estándar que equivale a los mismo 29,92 "Hg. Esto implica que permanecen 1 000 ft de diferencia entre el FL 190 y TA 18 000 ft.

En la parte derecha, el QNH es 30,30 "Hg y el ajuste estándar 29,92 "Hg, para una diferencia de 0,38 "Hg, los cuales representan una diferencia en altitud de unos 280 ft. El primer FL disponible por encima de 18 000 ft es FL 190 (19 000 ft); como la isobara de 29,92 "Hg está por encima del nivel medio del mar, los 280 ft de diferencia se suman a los 1 000 ft de la capa de transición normal, para un total de 1 280 ft de separación.

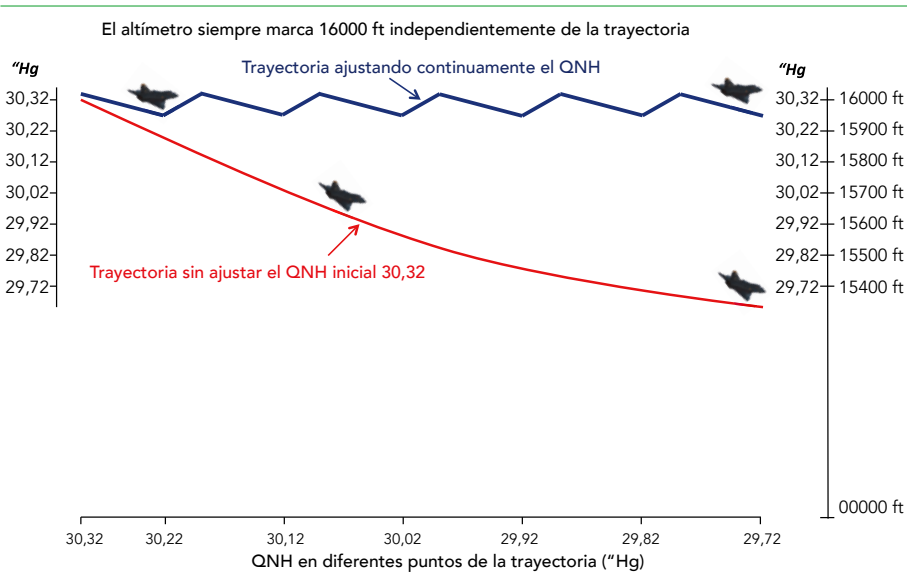


## 6.2.2 Errores por cambios de presión y temperatura

Una vez calado el altímetro con el QNH, las aeronaves que sobrevuelan el sector pueden separarse fácilmente debido a que tienen el mismo nivel de referencia al nivel medio del mar, situación que cambia a medida que la aeronave se aleja del aeródromo, lo cual produce errores debido al cambio de la presión atmosférica.

90 Cuando se vuela desde una zona de alta presión a una de baja presión altimétrica<sup>15</sup> (figura 44), el avión desciende aunque la lectura de la altitud sea la misma para el piloto. Tal situación podría generar un accidente si no se hace el respectivo ajuste altimétrico (el piloto cree que tiene más altitud). Lo contrario ocurre cuando el avión vuela desde una zona de baja presión a una de alta presión (el piloto cree que tiene menos altitud). En consecuencia, cuando no se realiza el respectivo ajuste altimétrico y se sobrevuela en una zona de baja presión, la aeronave se encuentra a menor altura de la indicado por el altímetro; por otra parte, cuando se vuela en una presión más alta, la aeronave tendrá una altura real más alta que la registrada por el altímetro.

Igualmente, con una misma presión de referencia ajustada en el altímetro, al desplazarse la aeronave desde un lugar cálido a otro más frío, en este último el altímetro indicará una altitud mayor que la real y viceversa. Siempre que se vuele de altas presiones a bajas presiones, o de altas temperaturas a bajas temperaturas, el altímetro registrará mayor o menor indicación que la distancia real según sea el caso.



**Figura 44.** Cambios de presión altimétrica.

Fuente: elaboración propia.

Si la temperatura real de cierta altitud ( $T_{real}$ ) es diferente a la temperatura estándar que le correspondería dada su distancia a superficie ( $T_{std\ de\ FL}$ ), se presentará sin duda un cambio en la presión atmosférica afectando las indicaciones del altímetro. Para determinar

15 Entiéndase como presión altimétrica a la presión atmosférica de superficie que ha sido ajustada, normalizada o reducida al nivel medio del mar. De esta manera, las diferencias de presiones entre dos puntos pueden calcularse sin tener en cuenta la elevación del punto.



la altitud verdadera es necesario realizar una corrección. El computador Dalton<sup>16</sup> realiza esta corrección mediante el cálculo de la *altitud verdadera*.

$$\text{Altitud verdadera} = \left( \frac{T_{\text{real}}}{T_{\text{std del FL}}} \right) \text{Altitud indicada}$$

Un ejemplo común lo representa la figura 45, en la cual se simula un vuelo de Bogotá a Palanquero, presumiendo un QNH en Bogotá de 30,34 "Hg (mayor presión altimétrica) y un QNH en Palanquero de 29,70 "Hg (menor presión altimétrica). La aeronave podría llegar a accidentarse si no realiza un ajuste altimétrico.

91

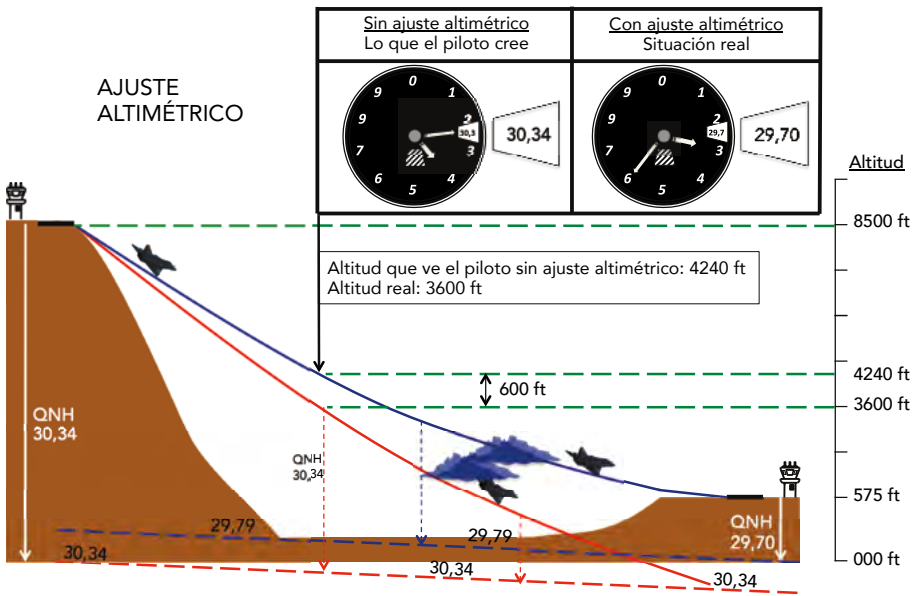


Figura 45. Ajuste altimétrico para evitar errores de altitud.

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta un factor aproximado de conversión de 1 000 ft por cada 1 "Hg, la aeronave podría impactar sobre el terreno si no hace el respectivo ajuste altimétrico, ya que su altitud indicada estaría en 640 ft por debajo de lo real.

$$30,34 \text{ "Hg} - 29,70 \text{ "Hg} = 0,64 \text{ "Hg}$$

$$(0,64 \text{ "Hg}) 1\ 000 = 640 \text{ ft}$$

16 El computador Dalton es un instrumento inventado a finales de 1930 por Philip Dalton que sirve para calcular de forma manual el consumo de combustible, corrección del viento, corrección de temperatura, velocidad de la aeronave y muchos otros parámetros que facilitan la planeación segura del vuelo.



## 6.3 Ejemplo práctico de altimetría

92

La altimetría está inmersa en todas las operaciones aéreas. Para que un piloto logre conocer la distancia de su aeronave a un punto de referencia, deben cumplirse dos pasos:

**Primero.** Suponiendo que el piloto desea conocer su altitud, los ATS deberán entregarle el QNH de la estación.

Los ATS obtienen el valor de la presión atmosférica en el nivel medio del mar, deduciéndolo de la lectura que un barómetro bien calibrado realiza en superficie y al cual se le aplica una corrección. Esta corrección se hace para cada aeródromo, y está basada en la elevación del punto y la atmósfera estándar; por lo tanto, siempre es la misma. Aunque existen varias maneras de realizar este cálculo, la mayoría de instrumentos incorporan la ecuación de reducción de la presión relacionada en el capítulo anterior:

$$P_{msl} = P_{sfc} \left[ \text{EXP} \left( \frac{gz}{RT_m} \right) \right]$$

Donde:

$P_{msl}$  = QNH, o presión reducida a nivel del mar

$P_{sfc}$  = QFE, o presión atmosférica de superficie medida en la estación por un barómetro

$g$  = aceleración de la gravedad ( $9,80617 \text{ m} / \text{s}^2$ )

$R$  = constante de los gases ( $287,04 \text{ m}^2 / \text{s}^2 \text{ K}$ )

$z$  = elevación de la estación (en metros)

$T_m$  = temperatura media =  $T_k - \left( \frac{0,0065 z}{2} \right)$

$T_k$  = temperatura en superficie ( $^{\circ}\text{K}$ )

Despejando la ecuación:

$$P_{msl} = P_{sfc} \left[ \text{EXP} \left( \frac{gz}{RT_m} \right) \right]$$

$$P_{msl} = P_{sfc} \left[ \text{EXP} \left( \frac{gz}{R \left[ T_k - \left( \frac{0,0065 z}{2} \right) \right]} \right) \right]$$

$$P_{msl} = P_{sfc} \left[ \text{EXP} \left( \frac{gz}{R [T_k - (0,00325 z)]} \right) \right]$$

$$P_{msl} = P_{sfc} \left[ \text{EXP} \left( \frac{9,80617 z}{R (T_k) - R (0,00325 z)} \right) \right]$$



$$P_{msl} = P_{sfc} \left[ \text{EXP} \left( \frac{9,80617 z}{287,04 T_k - 0,93288 z} \right) \right]$$

Ejemplo:

Suponiendo que el aeródromo se encuentra a 2600 m sobre el nivel del mar y con la ayuda de un barómetro obtienen la presión atmosférica en ese punto e instante, la cual es 23 "Hg con 10 °C de temperatura, hallar el QNH de la estación.

$$P_{msl} = P_{sfc} \left[ \text{EXP} \left( \frac{9,80617 z}{287,04 T_k - 0,93288 z} \right) \right]$$

$$\text{QNH} = 23 \left[ \text{EXP} \left( \frac{9,80617 (2600)}{287,04 (273 + 10) - 0,93288 (2600)} \right) \right]$$

$$\text{QNH} = 23 \left[ \text{EXP} \left( \frac{25496,024}{81232,3 - 2425,5} \right) \right]$$

$$\text{QNH} = 23 [ \text{EXP} (0,323525554) ]$$

$$\text{QNH} = 23 * e^{0,323525554}$$

$$\text{QNH} = 31,78 \text{ "Hg}$$

Es importante resaltar que el instrumento que reduce la presión en el aeródromo incluye, además, correcciones por gravedad y temperatura no contempladas en el ejemplo anterior.

**Segundo.** El altímetro debe realizar una diferencia de presiones entre el QNH de 31,78 "Hg suministrado por la torre de control y la presión registrada por las tomas estáticas. Así, un dato de presión se convierte en un dato de distancia vertical.

Los altímetros de tipo Kollsman están calibrados para la atmósfera estándar y, específicamente, para la curva de presiones de la tropósfera. En esta zona, la relación altura–presión se rige por la ecuación:

$$h = \frac{\left( 1 - \left( \frac{P_s}{P_{ref}} \right)^{0,19026} \right) 288}{0,00198122}$$

Esta fórmula sólo es válida hasta 36000 ft de altura y está implícita en el altímetro para calcular distancias mediante la diferencia de presiones.  $P_s$  es igual a la presión estática registrada por la aeronave;  $P_{ref}$  corresponde al valor de la presión altimétrica que los ATS suministran al piloto, y  $h$  representa la distancia entre  $P_s$  y  $P_{ref}$ .

Continuando con el ejemplo anterior, donde los ATS reportaron un QNH de 31,78 "Hg y la toma estática de la aeronave registra una presión atmosférica de 14,77 " Hg, el altímetro puede ahora deducir la altitud de la aeronave.

$$h = \frac{\left( 1 - \left( \frac{P_s}{P_{ref}} \right)^{0,19026} \right) 288}{0,00198122}$$

$$h = \frac{\left( 1 - \left( \frac{14,77}{31,78} \right)^{0,19026} \right) 288}{0,00198122}$$



$$h = \frac{(1 - (0,86434)) 288}{0,00198122}$$

$$h = \frac{(0,13566) 288}{0,00198122}$$

94  $h = 19720 \text{ ft}$

Respuesta:

Como se está tomando la referencia del QNH, en este caso 31,78 "Hg, la distancia del nivel medio del mar a la aeronave (altitud) es de 19 720 ft.

Es de aclarar que los altímetros de abordaje, por medio del transpondedor ubicado en cada aeronave, emiten constantemente la altitud medida por el instrumento. Esta señal es captada por el receptor de los radares en tierra y codificada de tal manera que los controladores radar puedan conocer la posición y altitud de la aeronave.

En caso de falla del altímetro, ésta será transmitida a los controladores en tierra, quienes estarían recibiendo la misma transmisión errónea del altímetro, tal como sucedió en el accidente del vuelo 603 de AeroPerú el 2 de octubre de 1996 mientras realizaban el vuelo Perú – Chile. En este caso, los pilotos descontrolados por las lecturas erróneas de su altímetro se confiaron en la información errónea que les estaban transmitiendo desde tierra. La causa del fatal accidente, en el cual murieron 70 personas, se debió a una mala inspección exterior de la aeronave, toda vez que olvidaron retirar la cinta adhesiva que cubría las tomas estáticas de la aeronave mientras el proceso de lavado del fuselaje.



# Capítulo 7.

## Claves meteorológicas

---

7.1 Interpretación clave METAR (*Aerodrome Routine METeorological Report*)

7.2 Interpretación clave SPECI (*Aerodrome SPECIal Meteorological Report*)



96

Las *claves meteorológicas* son la información meteorológica que ha sido cifrada por los servicios meteorológicos oficiales de cada país. Esta actividad se realiza con el fin de facilitar la divulgación e interpretación de la información y se basa en un conjunto de normas internacionales.

La información presente en este capítulo está basada en las normas de la *World Meteorological Organization* (WMO, 2011), la Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI, 2016) y el Reglamento Aeronáutico Colombiano (UAEAC, 2006).

## 7.1 Interpretación clave METAR (*Aerodrome Routine Meteorological Report*)

Un METAR es un informe meteorológico ordinario de aeródromo que los ATS elaboran cada hora o cada 30 minutos, dependiendo de las circunstancias atmosféricas. La FAC realiza informes METAR en CACOM-1 (Puerto Salgar, Cundinamarca), CACOM-2 (Apiay, Meta), CACOM-4 (Melgar, Tolima), CACOM-6 (Tres Esquinas, Caquetá), CACOM-7 (Cali, Valle del Cauca), CAMAN (Madrid, Cundinamarca) y GAORI (Marandúa, Vichada).

Independientemente de las condiciones atmosféricas presentes, este informe siempre comenzará por la palabra METAR, seguida en su orden por los siguientes grupos de información: grupo de identificación, viento en superficie, visibilidad horizontal, visibilidad vertical (nubes), temperaturas, presión e información suplementaria. A continuación, se presenta un METAR a modo de ejemplo y se interpreta paso a paso, realizando primero una división de los fenómenos reportados:

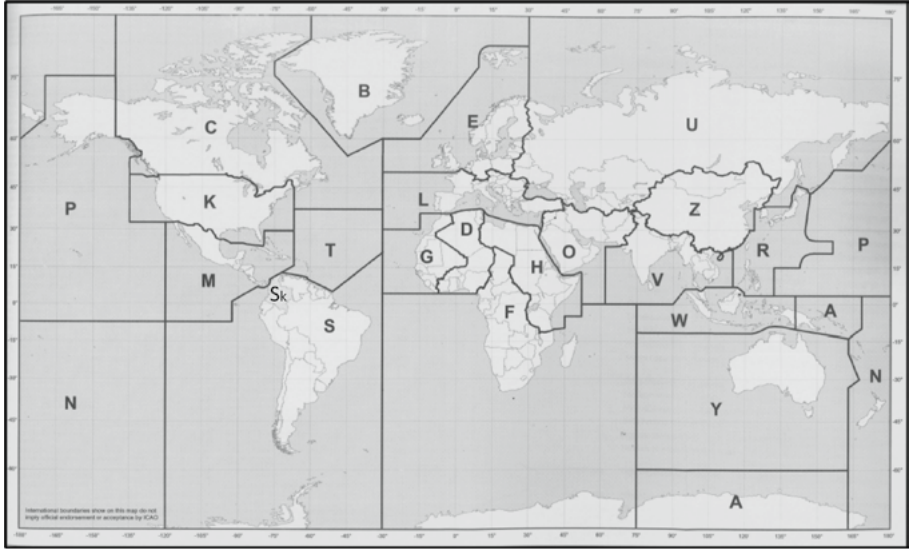
METAR SKBO 141900Z 32008KT 300V010 5000 2000W R13L/1500D R13R/M0100+TS-  
RA SCT018CB BKN050 20/18 A2998 RETS WS RWY19 APLSM

Tipo de la clave meteorológica	METAR
Identificación (lugar y hora expedición)	SKBO 141900Z
Viento (dirección e intensidad)	32008KT 300V010
Visibilidad horizontal	5000 2000W R13L/1500D R13R/M0100 + TSRA
Visibilidad vertical	SCT018CB BKN050
Temperaturas	20/18
Ajuste altimétrico	A2998
Información suplementaria	RETS WS RWY19 APLSM



### 7.1.1 Grupo de Identificación

**De lugar.** Está compuesto por un designador OACI de 4 letras. La primera representa la región del mundo, la segunda corresponde al país, y las dos últimas a la ciudad donde está ubicado el aeródromo. Como se observa en la figura 46, la letra S corresponde a todo Suramérica, mientras la letra K está asignada sólo para Colombia.



**Figura 46.** Regiones del mundo según el designador OACI.  
**Fuente:** Modificada del documento 7910 de OACI (2009).

Las dos últimas letras, *BO*, corresponden al aeródromo el Dorado ubicado en Bogotá. La tabla 9 resume los aeródromos más importantes de Colombia y la figura 50 los ubica geográficamente.

**Tabla 9.** Designadores OACI de los aeródromos colombianos.

Aeródromo	Sigla	Aeródromo	Sigla	Aeródromo	Sigla
Apiay	SKAP	Ibagué	SKIB	Popayán	SKPP
Arauca	SKUC	Ipiales	SKIP	Providencia	SKPV
Armenia	SKAR	Larandía	SKLR	Puerto Asís	SKAS
Bahía Solano	SKBS	La Macarena	SKNA	Puerto Carreño	SKPC
Barrancabermeja	SKEJ	Leticia	SKLT	Quibdó	SKUI
Barranquilla	SKBQ	Los Cedros	SKLC	Riohacha	SKRH
Bogotá	SKBO	Madrid	SKMA	Rionegro	SKRG
Bucaramanga	SKBG	Manizales	SKMZ	San Andrés y Prov.	SKSP
Buenaventura	SKBU	Marandúa	SKUA	San José del Guaviare	SKSJ
Cali	SKCL	Mariquita	SKQU	Santa Marta	SKSM
Cartagena	SKCG	Medellín	SKMD	San Vicente del Caguán	SKSV



Aeródromo	Sigla	Aeródromo	Sigla	Aeródromo	Sigla
Cartago	SKGO	Melgar	SKME	Saravena	SKSA
Corozal	SKCZ	Mitú	SKMU	Tame	SKTM
Cúcuta	SKCC	Montería	SKMR	Tolemaida	SKTI
Florencia	SKFL	Neiva	SKNV	Tres Esquinas	SKTQ
Girardot	SKGI	Ocaña	SKOC	Tumaco	SKCO
Guabito	SKGB	Palanquero	SKPQ	Valledupar	SKVP
Guapí	SKGP	Pasto	SKPS	Villavicencio	SKVV
Guaymaral	SKGY	Pereira	SKPE	Yopal	SKYP

Fuente: elaboración propia.

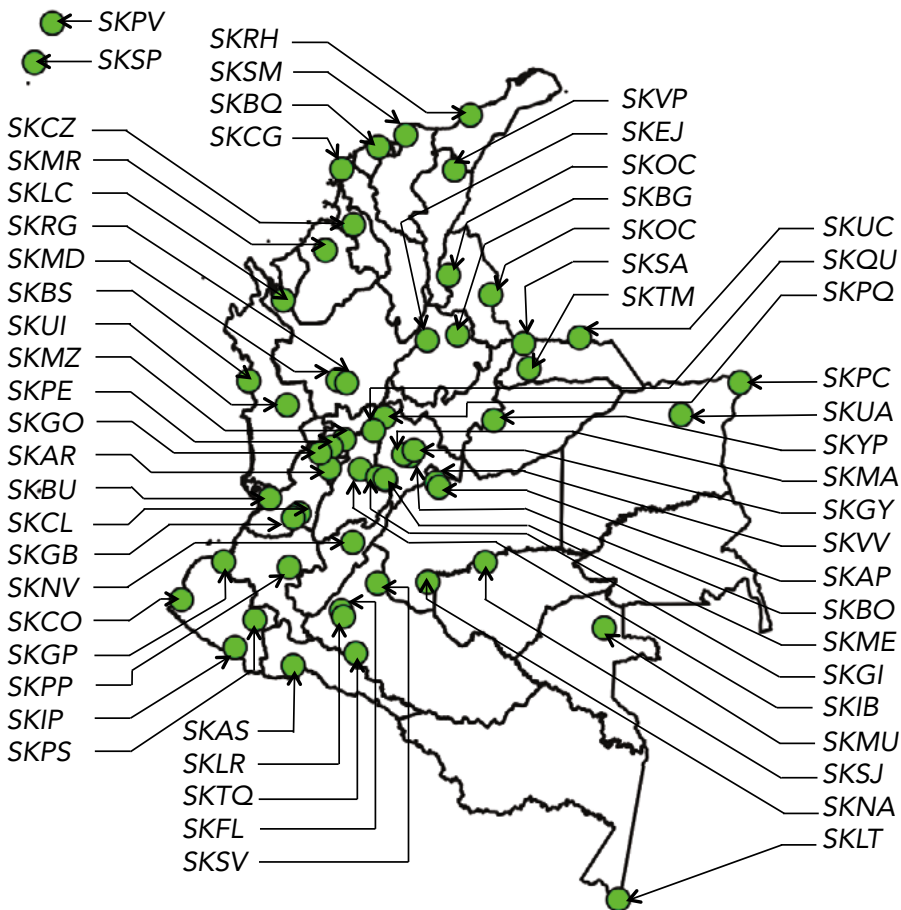


Figura 47. Ubicación y designadores OACI de los aeródromos colombianos.

Fuente: elaboración propia.

**De tiempo.** Indica la fecha en la que fue elaborado el METAR. Las dos primeras casillas representan el día y las siguientes cuatro la hora UTC en formato HHMM, siempre están seguidas de la letra Z (Zulu).



METAR **SKBO 141900Z**: METAR de Bogotá, Colombia, día 14, hora 19:00 Zulu. (14:00 h).

### 7.1.2 Grupo de viento en superficie

Las tres primeras casillas se indican en grados y corresponden a la dirección de donde proviene el viento. Las siguientes dos casillas representan la intensidad de viento, la cual siempre está acompañada por su unidad de medida –los nudos (kt) o metros por segundo (MPS)–. Sus variaciones más comunes son:

99

00000 KT	Viento en calma.
//// KT	Se presenta viento, pero por problemas técnicos no hay como medirlo.
30012 KT	Viento proveniente de los 300 grados con 12 kt de intensidad.
300V010	Viento variable entre 300° y 010°. Se reporta para un viento variable >3 kt y una variación de dirección $\geq 60^\circ$ pero $< 180^\circ$ . V significa <i>variable</i> .
32013G24	Viento proveniente de los 320° con 13 kt y ráfagas de 24 kt. Se reportan ráfagas cuando la intensidad es superior en 10 kt al viento promedio. La letra G representa ráfagas (gust)
VRB02	Viento variable con 2 kt de intensidad. Se codifica cuando la velocidad del viento es $< 3$ kt. Una variación del viento a mayores velocidades debe reportarse únicamente cuando la variación total es $\geq 180^\circ$ , o cuando sea imposible determinar una dirección única del viento.

METAR SKBO 141900Z **32008KT 300V010**: Viento de 320° con 8 nudos y variable entre 300 y 010 grados.

### 7.1.3 Grupo de visibilidad horizontal

Está dividido en tres subgrupos: la visibilidad horizontal en general, la visibilidad horizontal en cada una de las cabeceras, y el fenómeno meteorológico presente que afecta la visibilidad.

**Visibilidad horizontal.** La visibilidad dominante sobre el horizonte se da en cuatro cifras y se expresa en metros. Una visibilidad mayor a 10 km se denota como 9999. Cuando en uno de los ocho cuadrantes de la brújula la visibilidad es menor a 1500 m, o cuando la visibilidad de algún cuadrante es inferior al 50 % de la visibilidad predominante, el cuadrante debe identificarse según la rosa de los vientos.

METAR SKBO 141900Z 32008KT 300V010 **5000 2000W**: Visibilidad predominante de 5 000 m y visibilidad de 2 000 m al Whiskey de la estación.

**Alcance visual de pista.** Se utiliza sólo cuando el aeródromo tiene instrumento RVR. Siempre se compone por dos subgrupos: el primero usa las letras L (*left*), C (*center*) o R (*right*), si existen pistas paralelas, para indicar a cuál de las cabeceras se hace referencia. El segundo corresponde al dato de visibilidad, el cual puede estar acompañado con una letra antes y después del dato. Si la letra está antes del dato, puede ser una P (*plus*) o una M (*minus*), la cual indica que la visibilidad es mayor o menor a la que el sistema puede detectar. Si la letra está después del dato, puede ser una U (*upward*), una D (*downward*) o una N (*no change*), e indica la tendencia del alcance visual de pista a aumentar, disminuir o mantenerse sin cambios.

R13	Pista 13.
R13L	Pista 13 izquierda.



R13R	Pista 13 derecha.
R13C	Pista 13 central.
R13/P2000	Pista 13 con visibilidad mayor a 2 000 m. El RVR no tiene capacidad para medir visibilidades mayores a 2 000 m.
R13/M100	Pista 13 con visibilidad menor a 100 m. El RVR no tiene capacidad para medir visibilidades menores a 100 m.
R13/1500D	Pista 13 con visibilidad 1 500 m y tendencia a disminuir.
R13L/1500U	Pista 13 izquierda con visibilidad 1 500 m y tendencia a mejorar.
R13D/1500N	Pista 13 derecha con visibilidad 1 500 m y tendencia a permanecer estable.

METAR SKBO 141900Z 32008KT 300V010 5000 2000W **R13L/1500D R13R/M0100**: Alcance visual en la pista 13 izquierda de 1 500 m con tendencia a disminuir, en la pista 13 derecha la visibilidad es menor a 100 m.

**Fenómeno predominante o tiempo presente.** Siempre debe indicarse cuál es el fenómeno meteorológico que afecta la visibilidad. La tabla 10 resume las más comunes.

Tabla 10. Codificación de fenómenos meteorológicos.

Intensidad o proximidad		Descriptor		Fenómeno meteorológico				
				Código	Significado	Visibilidad	Código	Significado
-	Ligero	MI	Baja	BR	Neblina	> 1000 m	DZ	Llovizna (drizzle)
+	Fuerte	BC	Bancos aislados	FG	Niebla (Fog)	< 1000 m	RA	Lluvia (rain)
VC	Vecindad	PR	Parcial	HZ	Calima (Haze)	<= 5000 m	GR	Granizo grande
		SH	Chubascos (shower)	FU	Humo (Fume)	<= 5000 m	GS	Granizo pequeño
		TS	Tormentas (thunderstorm)	VA	Ceniza volcánica	<= 5000 m	SN	Nieve (Snow)
		FZ	Sobre enfriado (freezing)	SA	Arena	<= 5000 m		

Fuente: elaboración propia. Datos tomados de: WMO (2011), OACI (2016) y UAEAC (2006).

Sólo debe indicarse la intensidad o la proximidad, pero no las dos, siempre en el siguiente orden:

- Indicador de intensidad o proximidad. Se utiliza VC para fenómenos meteorológicos presentes entre 8 y 16 km de radio de cobertura desde el aeródromo.
- Descriptor.
- Fenómeno meteorológico observado.

METAR SKBO 141900Z 32008KT 300V010 5000 2000W R13L/1500D R13R/M0100 + **TSRA**: Tormenta de lluvia fuerte.

### 7.1.4 Grupo de visibilidad vertical

Está compuesto por tres letras y tres números que hacen referencia a las capas de nubes observadas (máximo tres capas de nubes, en alturas ascendentes). Las letras indican la cantidad de nubes que cubren el cielo (en octas), y los números indican la altura de la



base de las nubes en centenas de pies. Las únicas nubes que se especifican con nombre propio son los cumulonimbos (CB) o torrecúmulos (TCU). La tabla 11 representa la codificación utilizada para mediar la cantidad de nubes en las cercanías al aeródromo.

**Tabla 11.** Codificación de cantidad de nubes.

Octas	Código	Significado
1/8 a 2/8	FEW	Nubes pocas o escasas ( <i>few</i> )
3/8 a 4/8	SCT	Nubes dispersas ( <i>scattered</i> )
5/8 a 7/8	BKN	Nubes fragmentadas ( <i>broken</i> )
8/8	OVC	Totalmente cubierto ( <i>overcast</i> )

**Fuente:** elaboración propia. Datos tomados de: WMO (2011).

Se cifra /// cuando el cielo esta oscurecido y no se puede evaluar la visibilidad vertical, por ejemplo, cuando la niebla es tan espesa y alta que no permite observar el techo de nubes.

Se cifra **NDC** (*No Detected Clouds*) cuando un sistema automático ha hecho la observación y éste no ha detectado nubes.

Se cifra **NSC** (*No Significant Clouds*) cuando no hay nubes por debajo de la altitud mínima del sector o de 5000 ft.

Se cifra **CAVOK** (*Ceiling And Visibility OK*) cuando la visibilidad es mayor a 10 km y no existe presencia de nubes por debajo de la altitud mínima del sector o de 5000 ft, sin presencia de cumulonimbos, ni fenómenos meteorológicos de tiempo presente. Reemplaza los grupos de visibilidad, fenómeno de tiempo presente y nubes. La tabla 12 resume la altitud mínima del sector donde la FAC es el responsable primario de elaborar el informe METAR.

**Tabla 12.** Altitud mínima del sector unidades FAC.

Unidad FAC	Altitud mínima del sector
CACOM-1	11 800 ft
CACOM-2	16 000 ft
CACOM-4	12 000 ft
CACOM-6	2 000 ft
CACOM-7	15 500 ft
GAORI	2 000 ft

**Fuente:** elaboración propia. Datos suministrados por la Subdirección de procedimientos aeronáuticos de la FAC

METAR SKBO 141900Z 32008KT 300V010 5000 2000W R13L/1500D R13R/M0100 + **TSRA SCT018CB BKN050**: Nubes dispersas a 1 800 ft con presencia de cumulonimbos y nubes fragmentadas a 5 000 ft.



## 7.1.5 Grupo de temperaturas

Incluye la temperatura ambiente (T) y la temperatura del punto de rocío (Td). Estas variables están muy relacionadas con la humedad, cobertura del cielo y visibilidad. La diferencia de estas dos temperaturas suele estar relacionada con el comportamiento de la visibilidad horizontal y vertical. Si la diferencia es poca, la visibilidad tiende a ser mínima. La temperatura de punto de rocío nunca podrá ser mayor al valor de la temperatura ambiente. Se cifra XX/XX cuando no se tiene dato de temperatura ni punto de rocío.

METAR SKBO 141900Z 32008KT 300V010 5000 2000W R13L/1500D R13R/M0100+TS-RA SCT018CB BKN050 **20/18**: Temperatura 20 °C, punto de rocío 18 °C.

## 7.1.6 Grupo de ajuste altimétrico

Si el ajuste altimétrico se indica en hectopascales (hPa) o milibares (mb), se le antepone la letra Q; si se expresa en pulgadas de mercurio ("Hg), se le antepone la letra A.

METAR SKBO 141900Z 32008KT 300V010 5000 2000W R13L/1500D R13R/M0100+TS-RA SCT018CB BKN050 20/18 **A2998**: Presión altimétrica de 29,98 "Hg.

## 7.1.7 Grupo de información suplementaria

Información relevante del aeródromo que podría afectar las operaciones y que los tripulantes deben conocer. Puede ser:

- **Condiciones meteorológicas recientes (RE)**. Se utilizan para reportar condiciones recientes ocurridas antes de la hora de observación, seguidas del fenómeno meteorológico.
- **Cizalladura del viento o Wind Shear**. Se expresa con el código WS seguida de la abreviatura de pista (RWY) y el número de la cabecera (por ejemplo: WS RWY19). Si en ambas pistas se presenta el fenómeno, se representaría WS ALL RWY (*wind shear* en ambas pistas).
- **Estado del aeródromo**. Se puede codificar con el siguiente código estándar:

APCLM <sup>17</sup> o AD BLW MNM MET	Airport CLosed Meteorology (Aeropuerto cerrado por meteorología) AeroDrome BeLoW MiNiMum METeorological Las condiciones mínimas visuales (VMC) para los aeródromos colombianos son 1 500 ft de visibilidad vertical y 5 km de visibilidad horizontal. Consultar AIP COLOMBIA (2014) para excepciones.
APCLO	Airport CLosed Operation (Aeropuerto cerrado por condiciones técnicas).
APRSM o AD OPER IMC	Airport Restricted Meteorology (Aeropuerto restringido por meteorología) AeroDrome Operation in Instrumental Meteorological Conditions.
RMK	Información requerida por la autoridad nacional del país.

METAR SKBO 141900Z 32008KT 300V010 5000 2000W R13L/1500D R13R/M0100+TS-RA SCT018CB BKN050 20/18 A2998 **RETS WS RWY19 AD OPER IMC**: tormenta reciente, *wind shear* en la pista 19, aeródromo operando en condiciones meteorológicas bajo instrumentos.

<sup>17</sup> Según la Circular Técnica 047 UAEAC (2012), se cambiarán las siglas APCLM por AD BLW MNM MET y APRSM por AD OPER IMC.



### 7.1.8. Lectura completa del METAR

METAR de Bogotá Colombia, día 14, hora 19:00 UTC. Viento de 320 grados con 8 nudos y variable entre 300 y 010 grados. Visibilidad predominante de 5 000 m y visibilidad de 2 000 m al Whiskey de la estación. En la pista 13 izquierda, la visibilidad es de 1 500 m con tendencia a disminuir, mientras que en la pista 13 derecha la visibilidad es menor a 100 m con fuertes tormentas de lluvia. Nubes dispersas a 1 800 ft con presencia de cumulonimbos y nubes fragmentadas a 5 000 ft. Temperatura 20 °C, punto de rocío 18 °C. Presión (QNH) 29,98 "Hg. Tormentas de lluvia fuerte, *wind shear* en la pista 19, aeródromo operando en condiciones meteorológicas bajo instrumentos.

103

Ejemplos:

SKBS 261600Z /////KT 5000 MIFG FEW005 SCT025 BKN070 XX/XX A//// RERA

SKAS 261600Z 00000KT CAVOK 32/20 A2990

SKFL 261600Z 17010KT 4000 HZ SCT035 32/20 A2988 RMK VCVA/NW

SKIB 261600Z 13005KT 050V190 9999 SCT023 SCT200 27/19 A3005

SKGB 261600Z 00000KT 3000 BR SCT080 28/17 A2993

## 7.2 Interpretación clave SPECI (Aerodrome SPECIal Meteorological Report)

Es el nombre de la clave correspondiente a un informe meteorológico especial en un aeródromo. Los informes SPECI pueden difundirse en cualquier momento si se cumplen determinados criterios. El formato de la clave SPECI es igual a la clave METAR, excepto porque pueden emitirse en cualquier espacio de tiempo. Más que un informe rutinario, es un informe de advertencia sobre un fenómeno meteorológico que causa variaciones importantes en la meteorología del aeródromo.

Se difundirá un SPECI cuando uno de los elementos meteorológicos empeore o mejore de forma significativa. Debería difundirse un SPECI relativo a un mejoramiento de las condiciones únicamente si dicho mejoramiento ha persistido durante 10 minutos.

Ejemplo de la emisión de un SPECI basado en las condiciones atmosféricas del METAR que lo precede:

**METAR** SKTM 090900Z 17005KT 9000 DZ SCT050

**SPECI** SKTM 090914Z 18010KT 2000 RA BKN004CB





## 7.3 Interpretación pronóstico TREND (*TREND forecast*)

104 El pronóstico de tendencia TREND, reportado al final del METAR, pretende informar a los pilotos de las tendencias y cambios importantes con respecto al viento en superficie, visibilidad, condiciones meteorológicas y nubes que se esperan en el aeródromo para las dos horas siguientes contadas a partir del momento del informe METAR o SPECI. Cuando no se prevé ningún cambio significativo, se codifica NOSIG (NO SIGNificant change).

METAR SKBO 141900Z 32008KT 300V010 5000 2000W, R13/P1500N VCTS SCT018CB BKN050 20/18 A2998 RETS WS RWY31 **NOSIG**

El pronóstico TREND comienza con los códigos **BECMG** o **TEMPO** seguido de las letras **AT**, **FM** o **TL**.

AT	a las
FM	desde
TL	hasta

METAR SKBO 141900Z 32008KT 300V010 5000 2000W, R13/P1500N VCTS SCT018CB BKN050 20/18 A2998 RETS WS RWY31 **BECMG AT2000 35004KT 1000W -DZ**: cambios permanentes a las 20:00 Zulu, se prevé que el viento cambie de dirección a los 350° con 4 nudos de intensidad, disminución de la visibilidad a 1 000 m por el cuadrante Whiskey y llovizna débil generada por la tormenta reportada en las vecindades (VCTS).

## 7.4 Interpretación de un TAF (*Aerodrome Forecast*)

Es el pronóstico meteorológico de las condiciones significativas esperadas para un aeródromo y que podrían afectar la operación de las aeronaves. Es posible encontrar un TAF AMD (*amended*), CNL (*cancelled*) y COR (*corrected*), usado para enmendar, cancelar o corregir un TAF difundido con anterioridad.

Aunque el período del pronóstico puede abarcar de 6 a 30 horas, en Colombia los TAF tienen una vigencia de 24 horas y se realizan sobre los aeródromos principales. Estos son: SKBO, SKBG, SKBQ, SKCC, SKCG, SKPE, SKRG, SKSP. La FAC elabora TAF sobre SKAP, SKGB, SKLR, SKME, SKNA, SKPQ, SKQU, SQTQ, SKUA y SKYP.

Los códigos y abreviaturas son muy similares a los usados en la clave METAR, así que solo se profundizará en las particularidades del TAF<sup>18</sup>. Este informe contiene los siguientes grupos de datos:

<sup>18</sup> Se marcarán con un \* los campos del TAF que por su particularidad no fueron mencionados en la interpretación de un METAR.



TAF SKME 252200Z 2600/2624 16006KT 9999 SCT050 BECMG 2515/2519 13008KT 9999 SCT090 BECMG 2522/2524 21006KT 6000 DZ BKN030 TN20/2610Z TX31/2620Z

Tipo de la clave meteorológica	TAF
Identificación (lugar y hora expedición)	SKME 252200Z
Periodo de validez*	2 600 / 2624
Viento (dirección e intensidad)	6 006 KT
Visibilidad horizontal	9 999
Primer grupo indicador de cambio*	BECMG 2515/2519 13008KT 9999 SCT090
Segundo grupo indicador de cambio*	BECMG 2522/2524 21006KT 6000 DZ BKN030
Temperatura máxima y mínima*	TN20/2610Z TX31/2620Z

### 7.4.1 Grupo periodo de validez

Está compuesto por dos subgrupos. El primer grupo de cuatro cifras corresponde al día y hora en las que inicia el periodo de validez del pronóstico, en formato DDHH; no se debe confundir con la hora de expedición. El segundo grupo, también de cuatro cifras, corresponde al día y hora en la que finaliza el pronóstico.

TAF SKME 252200Z **2600/2624**: El periodo de validez del TAF inicia el día 26 a las 00 Zulu y finaliza el día 26 a las 24 Zulu. Desafortunadamente, el formato de esta hora es usado incorrectamente por los pronosticadores; por ello, 2600/2624 podría variar según dos criterios:

- Formato utilizado para referirse a la última hora del día. Podría encontrarse como: 2600/2700, 2524/2624
- Omisión del día si el periodo de validez no supera las 24 horas. En este caso podría encontrarse como: 260024, 26/0024, 252424, 25/2424

### 7.4.2 Grupo de indicadores de cambio

Códigos utilizados para informar la variación permanente o temporal de alguna de las condiciones atmosféricas previamente reportadas en el TAF. Estas son:

BECMG (Becoming)	Se utiliza para describir cambios permanentes de las condiciones meteorológicas. Las condiciones atmosféricas predominantes son suplantadas por las del BECMG hasta que se finalice el pronóstico. El cambio en las condiciones debe tomar entre 1 y 4 horas máximo.
TEMPO (Temporary o temporarily)	Se usa para pronosticar fluctuaciones temporales que deben ser inferiores a 1 hora. Si la fluctuación se repite, la suma del tiempo de estas dos fluctuaciones debe ser menor a la mitad del tiempo contemplado dentro de los límites del TEMPO.
FM	No se utiliza en Colombia. Se usa como término de exactitud en la ocurrencia de un fenómeno meteorológico.
PROB30 PROB40	Probabilidad del 30 % o 40 % de que el pronóstico realizado difiera de los valores reales de ocurrencia. Sólo es compatible con el grupo TEMPO, así que nunca debe usarse combinado con BECMG y FM.

TAF SKME 252200Z 2600/2624 16006KT 9999 SCT050 **BECMG 2615/2619** 13008KT 9999 SCT090 BECMG 2622/2624 21006KT 6000 DZ BKN030.



BECMG 2515/2519: pronostica cambios permanentes que podrían iniciar a las 15:00 Zulu y terminar a las 19:00 Zulu del día 26.

### 7.4.3 Grupo de temperaturas

106

Esta compuesta por dos subgrupos, cada grupo inicia con las abreviaturas TN y TX según corresponda a la temperatura mínima o máxima, seguidas por el día y hora en la que se pronostican y finalizando con la letra Z (Zulu).

No es obligatorio incluirlas en los TAF, pero en el caso de Colombia, existe un acuerdo regional de navegación aérea que obliga a reportar la temperatura máxima y mínima que se prevén durante el período de validez del TAF.

TAF SKME 252200Z 2600/2624 16006KT 9999 SCT050 BECMG 2515/2519 13008KT 9999 SCT090 BECMG 2522/2524 21006KT 6000 DZ BKN030 **TN20/2610Z TX31/2620Z**: se pronostica que el día 26 se presentará una temperatura mínima de 20 °C a las 10:00 Zulu y una temperatura máxima de 31 °C a las 20:00 Z.

Ejemplos:

TAF SKBG 242200Z 2500/2524 VRB02KT 9999 FEW015 SCT200 TEMPO 2510/2513 8000 MIFG SCT012 SCT100 BECMG 2515/2517 32010KT TX25/2518Z TN17/2511Z

TAF SKBO 242200Z 2500/2524 06006KT 9999 FEW020 SCT200 TEMPO 2506/2512 9000 MIFG FEW017 TEMPO 2509/2511 2000 BCFG BECMG 2516/2518 29010KT TEMPO 2519/2522 DZ SCT015CB SCT017 TX21/2519Z TN05/2511Z

TAF SKBQ 242200Z 2500/2524 03008KT 9999 FEW017 SCT200 TEMPO 2502/2510 CAVOK TEMPO 2510/2513 5000 BR SCT010 TEMPO 2518/2522 32010KT SCT015 TX33/2518Z TN25/2511Z

TAF SKCC 242200Z 2500/2524 00000KT 9999 FEW020 SCT200 TEMPO 2510/2512 9000 MIFG FEW015 BECMG 2516/2518 36010KT TEMPO 2519/2522 VCSH SCT017TCU TX32/2518Z TN20/2511Z

TAF SKCG 242200Z 2500/2524 04006KT 9999 FEW017 SCT200 TEMPO 2504/2510 NSC TEMPO 2510/2512 6000 SCT015 BECMG 2516/2518 34010KT TX33/2518Z TN24/2511Z

TAF SKCL 242200Z 2500/2524 VRB02KT 9999 FEW020 SCT200 TEMPO 2504/2508 VCSH FEW017 BKN090 BECMG 2517/2519 33010KT PROB40 TEMPO 2519/2523 8000 VCSH SCT015TCU BKN090 TX31/2518Z TN19/2511Z

TAF SKGB 242200Z 2500/2524 24006KT 8000 VCSH BKN030 BECMG 2506/2510 21008KT 6000 DZ BKN060 BECMG 2514/2519 19006KT 9000 VCSH SCT050 BECMG 2520/2524 32006KT OVC060 TN22/2510Z TX28/2520Z



# 7.5 Interpretación clave AIREP (*Air REPort*)

El AIREP se contempla dentro de las regulaciones del OACI (2016); es el informe meteorológico y operacional que una aeronave reporta a los ATS mientras realiza su vuelo. Hay dos tipos de aeronotificación AIREP:

107

**Obligatorio.** Se realiza en lugares geográficos específicos donde las tripulaciones deben notificar ciertas condiciones meteorológicas. Estos puntos son definidos teniendo en cuenta parámetros como:

- Análisis de información histórica sobre fenómenos meteorológicos adversos y frecuentes en ciertos puntos geográficos.
- Climatología regional.
- Zonas de interés operacional.

**Especial.** Son aquellos puntos geográficos en los que las tripulaciones encuentran un fenómeno meteorológico peligroso que consideran pertinente notificar, con lo cual alertan del peligro a otras aeronaves que sobrevuelan esa zona.

## 7.5.1 Puntos en común en un AIREP obligatorio y especial

Identificación de la aeronave	Matrícula de la aeronave (Ej. FAC 1005).
Posición	Pueden reportar la posición de la aeronave en términos de latitud y longitud o refiriéndose directamente al nombre de un punto de notificación obligatorio.
Hora de la notificación	Hora y minutos UTC (cuatro cifras) en la que se cruza el punto de notificación ATS/MET o en el que observa el fenómeno.
Altitud o nivel de vuelo	Debe informar el FL en el que cruza el punto de notificación ATS/MET (Ej. FL 210), el punto geográfico significativo o el nivel donde observó el fenómeno.
Próxima posición	Debe informar la próxima posición según el plan de vuelo y la hora planeada de llegada.

## 7.5.2 Fenómenos que deben reportarse en un AIREP obligatorio

Temperatura	Se reporta en grados Celsius enteros.
Humedad	Se informa en porcentaje.
Viento	Puede indicarse que el viento está en calma o reportar la dirección en grados enteros y la intensidad en nudos.
Turbulencia	<b>Ligera.</b> Si la velocidad fluctúa entre de 5 y 15 kt, y los objetos en reposo tienden a desplazarse.
	<b>Moderada.</b> Si la velocidad varía entre 15 y 25 kt, y hay pasajeros posiblemente desplazados fuera del asiento.
	<b>Severa.</b> Si la velocidad es superior a 25 kt con fuertes vibraciones en el panel de instrumentos y los pasajeros sufren fuertes sacudidas.



Engelamiento	Ligero. Cuando la acumulación se presenta lentamente y puede llegar hasta 5 mm en 5 minutos. El rendimiento de la aeronave es poco afectado.
	Moderado. Cuando la acumulación de hielo puede llegar de 5 a 50 mm en 5 minutos y la velocidad se reduce hasta un 15 % con vibraciones y lecturas erróneas en el panel de instrumentos.
	Severo. La acumulación sobrepasa los 50 mm en 5 minutos, la velocidad se reduce hasta un 25 %, se pierde potencia y se sienten fuertes vibraciones.

### 7.5.3 Fenómenos que se deben reportar en un AIREP Especial

Turbulencia moderada o severa
Engelamiento moderado o severo
Onda orográfica moderada o fuerte
Tormentas con y sin granizo
Tempestad de polvo o arena fuerte
Nubes de ceniza volcánica
Actividad volcánica precursora de erupción o erupción volcánica
Presencia de nubes cumulonimbos

### 7.5.4 Codificación y decodificación de la aeronotificación AIREP

Una vez las dependencias ATS reciban la aeronotificación, proceden a codificar los datos según OACI (2011) y OACI (2016), teniendo como referencia la tabla 13.

**Tabla 13.** Codificación AIREP de fenómenos meteorológicos.

Código	Lenguaje claro
ARP	Aeronotificación ordinaria
ARS	Aeronotificación especial
LGT	Ligero
MOD	Moderado
SEV	Severo
TS	Tormenta sin granizo
TSGR	Tormenta con granizo
SS	Tormenta de polvo o arena
VA	Actividad volcánica previa a la erupción o una erupción volcánica
VA CLD	Nube de ceniza volcánica
TURB	Turbulencia
ICE	Engelamiento
GS	Granizo
CB	Nubes cumulonimbos
MTW	Onda orográfica

**Fuente:** elaboración propia. Datos tomados de: OACI (2011) y OACI (2016).



Ejemplo:

ARP FAC1004 N045012 W740623 260411 01:15Z F210 MS46 360/190KT TURB FBL ICE MOD 90.

Aeronotificación ordinaria reportada por el FAC 1004 en las coordenadas geográficas N045012 y W740623 el día 26/ABR/11 a las 01:15 Zulu, nivel de vuelo 210, temperatura -46 °C, viento de los 360° con 190 kt de intensidad, turbulencia ligera, engelamiento moderado y humedad relativa del 90 %.

ARS FAC 1004 N045012 W740623 260411 01:15Z 060FT TURB SEV ICE MOD MTW MOD TS VA CLD CB.

Aeronotificación especial reportada por el FAC 1004 en las coordenadas geográficas N045012 W740623 el día 26/ABR/11 a las 01:15 Zulu, altitud 6 000 ft, turbulencia severa, engelamiento moderado, onda orográfica moderada, tormenta sin granizo, nube de ceniza volcánica y cumulonimbos.

109

### 7.5.5 Procedimiento para la captura de la aeronotificación AIREP en la FAC

Cuando una aeronave notifica un AIREP a las dependencias ATS de la FAC (Consola COFAC / Control de Área / Centro de Comunicaciones), éstas ingresan la aeronotificación al sistema de información meteorológica (SIMFAC), con lo cual queda publicada de inmediato (figura 48). Después de esto, un símbolo triangular genera una alerta en el aplicativo Tiempo Actual, el cual cambia de colores dependiendo de las siguientes consideraciones:

ROJO	Cualquier aeronotificación especial (ARS). Cuando algún fenómeno meteorológico sea notificado con intensidad fuerte (SEV).
AMARILLO	Cuando algún fenómeno meteorológico sea notificado con intensidad moderada (MOD).
VERDE	Cuando algún fenómeno sea notificado con intensidad ligera (LGT) o cuando no se notifique turbulencia ni engelamiento.

Las dependencias ATS y tripulaciones deben realizar seguimiento a los AIREP, producir la alerta e informar a las otras aeronaves que sobrevuelen el sector.

1. La aeronave genera el AIREP en vuelo
2. Dependencia ATS ingresa AIREP
3. AIREP queda publicado

110

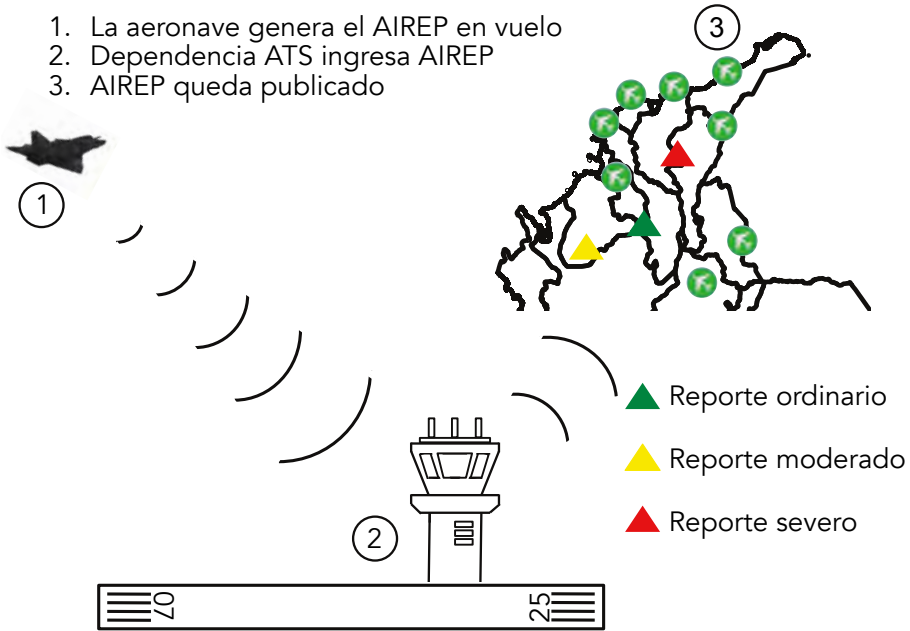


Figura 48. Procedimiento reporte AIREP.

Fuente: elaboración propia.



# Capítulo 8.

## Peligros meteorológicos – engelamiento

---

- 8.1 Altitudes favorables para el engelamiento
- 8.2 Nubes que producen engelamiento
- 8.3 Factores para que se produzca engelamiento
- 8.4 Clasificación del engelamiento
- 8.5 Tipos de hielo en los que se manifiesta el engelamiento
- 8.6 Engelamiento en la aeronave



112

Según un estudio de Moreno y Gil (2003), con datos del periodo 1970 a 1999, el *engelamiento* es el factor meteorológico que más ha producido incidentes y accidentes aéreos a nivel mundial (36 %), y es el único que ha mantenido la regularidad de accidentes a lo largo del tiempo. Para evitarlo, se debe conocer su mecanismo de acción para así minimizar sus efectos al aplicar los procedimientos estipulados en caso de encontrar indicios de su presencia.

Se conoce como *engelamiento* al congelamiento de las gotas de agua de las nubes que impactan sobre la estructura de un avión en vuelo (borde de ataque de los perfiles alares, hélices, antenas, etc.), o que ingresan dentro de alguno de sus componentes que tienen contacto con el aire exterior (tubo Pitot, carburador, etc.). Puede también considerarse como un caso especial la escarcha, la cual se forma cuando el avión está en tierra durante noches frías y con un alto contenido atmosférico de vapor de agua en capas bajas. Se trata de un fenómeno que no sólo afecta seriamente las características aerodinámicas de la aeronave, sino también el funcionamiento de sus componentes.

## 8.1 Altitudes favorables para el engelamiento

---

El engelamiento puede ocurrir casi a cualquier altitud (figura 49) que cumpla dos condiciones esenciales: humedad visible (nubes o precipitación) y temperatura igual o inferior a 0 °C. No debe olvidarse que el enfriamiento aerodinámico puede descender la temperatura de las superficies del avión a 0 °C, aun cuando la temperatura del aire esté unos cuantos grados más caliente.

En Colombia, el engelamiento normalmente se produce sobre los 16 000 ft, altitud de la isoterma de 0 °C. Puede alcanzar un grado de moderado a severo en zonas montañosas y, en algunos sectores, podría encontrarse por encima de 12 000 ft. En latitudes medias, el engelamiento se da con mayor frecuencia en altitudes más bajas, donde la mayoría de los episodios ocurren entre 5 000 ft a 13 000 ft.



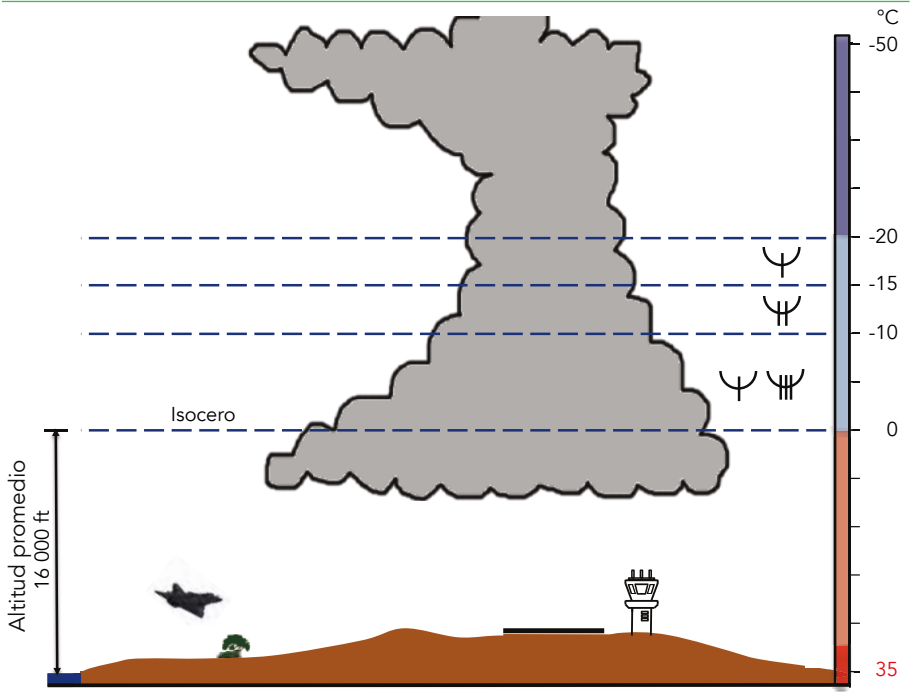


Figura 49. Altitudes favorables de engelamiento.

Fuente: elaboración propia.

## 8.2 Nubes que producen engelamiento

El engelamiento puede presentarse en cualquier tipo de nubes ya que cualquiera de ellas puede aportar el contenido de agua líquida que necesita. Sin embargo, el piloto también debe evitar volar sobre el tope de nubes, recordando que aunque no pueda ver el agua condensada en forma de nube, ello no significa que la humedad no esté afectando la aeronave.

Las nubes de desarrollo vertical generan el engelamiento más fuerte. Los torrecúmulos (TCU) y cumulonimbos (Cb) tienen un elevado contenido de agua líquida y pueden afectar gravemente el funcionamiento de la aeronave. En Colombia, el engelamiento por nubes medias puede ser moderado, con temperaturas entre  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  dependiendo de la densidad de la nube; sin embargo, lo habitual por la baja cantidad de agua líquida y espesor es que presenten un engelamiento ligero. Las nubes bajas tienen un bajo contenido de agua líquida y pocas veces alcanzan la isocero<sup>19</sup>, así que las probabilidades de engelamiento son mínimas. Tampoco es probable que las nubes altas reúnan las características atmosféricas que se requieren para el engelamiento.

<sup>19</sup> Nombre especial para referirse a la isoterma de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

# 8.3 Factores para que se produzca engelamiento

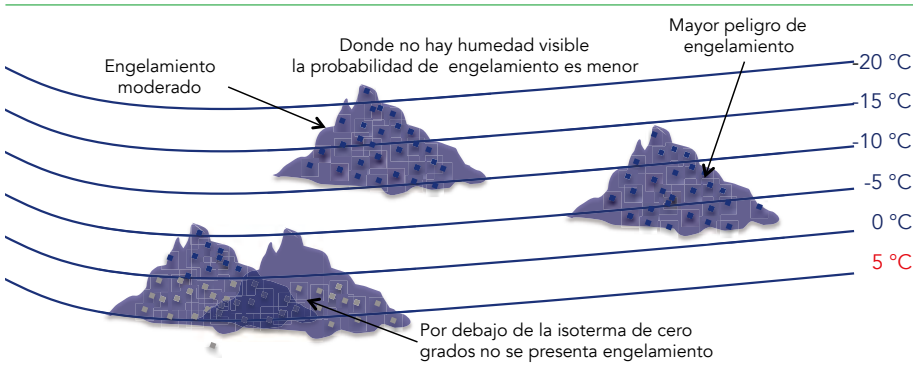
114

## 8.3.1 Factores mínimos

Como su nombre lo indica, son los factores meteorológicos mínimos para que se produzca el engelamiento. De los tres, el piloto es consciente de la presencia del agua si se encuentra volando entre nubes y cuenta además con el dato de temperatura externa, así que deberá prestar especial atención a estos parámetros. Basado en datos tomados desde aeronaves con equipos especializados, Politovich (1989) resume las condiciones más favorables para que se produzca el engelamiento, entre las cuales destaca la temperatura, la cantidad de agua líquida y el tamaño de la gota:

- Agua líquida.
- Temperatura de la gota inferior a 0 °C (estado de sobre enfriamiento).
- Tamaño de la gota

Todas las aeronaves que se encuentren por encima de la isoterma de 0 °C y en área de humedad visible estarán expuestas a condiciones de engelamiento. Sin lluvia o nubes, el peligro de engelamiento es mucho menor (figura 50).



**Figura 50.** Gotas sobreenfriadas.

**Fuente:** elaboración propia.



### 8.3.2 Factores que lo intensifican

Son factores adicionales no esenciales para que se presente el engelamiento. Estos pueden ser más fácilmente identificados por las tripulaciones.

- **Velocidad de la aeronave.** Durante el vuelo y por efecto del rozamiento con el aire, la estructura de la aeronave se calienta: a mayor velocidad, menor probabilidad de formación de hielo. Sin embargo, cuando el avión vuela entre nubes, la protección proporcionada por este calentamiento cinético se reduce, ya que el calor debe gastarse también en elevar la temperatura del agua recolectada a la temperatura de la superficie y en proveer calor latente de evaporación a las mismas.
- **Eficiencia de la aeronave para acumular hielo.** Es una característica que varía según la estructura y perfil aerodinámico de cada aeronave.
- **Topografía del sector.** Cuando se produce un forzamiento orográfico, el aire tiende a enfriarse, alcanzado la saturación e intensificando las condiciones de engelamiento. Según la Federal Aviation Administration–FAA (2000), cada región montañosa tiene áreas definidas de formación de hielo que dependen del flujo del viento y que se extienden por encima de 5000 ft sobre la cima de las montañas.
- **Diámetro de la gota.** Según la Advisory Circular *Flight in icing conditions* (2015), las capas superiores de las nubes contienen a menudo la mayor cantidad de agua líquida y las gotas más grandes.
- **Velocidad del aire.** Al aumentar la velocidad del aire, se aumenta implícitamente la captura y cantidad de gotas superenfriadas y, por lo tanto, tiene el mismo efecto que una mayor concentración de agua líquida en la nube (UK. Met. Office, 1994)

En Colombia, el engelamiento se ve intensificado por las zonas más altas del país. La figura 51 muestra el pronóstico de este fenómeno para el día 5 de febrero de 2013 a las 19:00 hora local; en él se indica la altitud de la isocero en FL y los sectores más afectados, los cuales corresponden a las zonas montañosas. Aunque en la figura 51 no es posible observar el engelamiento sobre el océano Pacífico y mar Caribe, también puede presentarse.

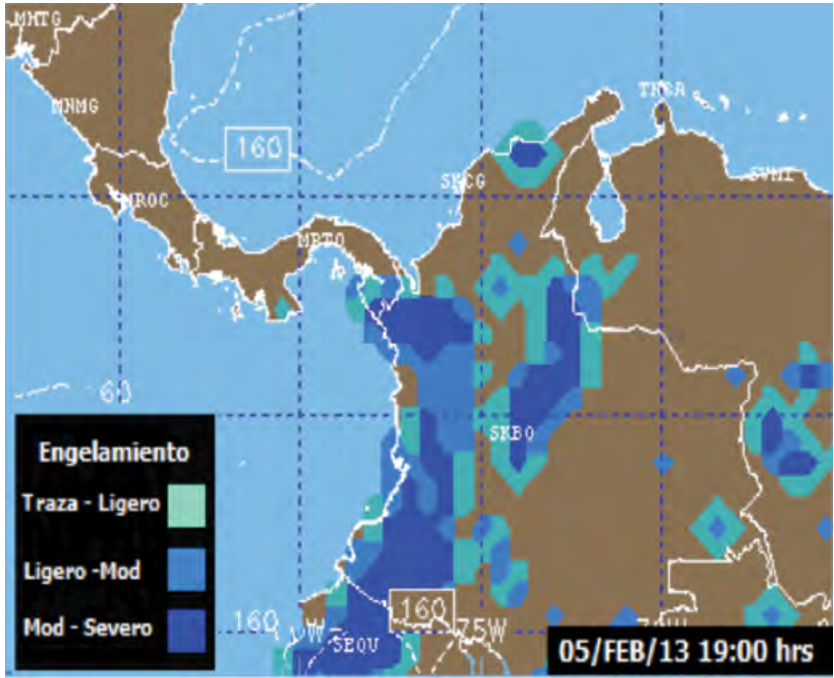


Figura 51. Engelamiento acentuado por montaña.

Fuente: Tomado de JetPlan (s.f.).

## 8.4 Clasificación del engelamiento

La clasificación del engelamiento se realiza según su intensidad, la cual puede ser de tipo traza, ligero, moderado o severo, en función de la cantidad de hielo que se forma por unidad de tiempo.

**Traza.** Es un tipo de engelamiento casi imperceptible para la tripulación. El hielo se disipa casi a la misma velocidad con la que se forma.

**Ligero.** El hielo se acumula lentamente y puede llegar a 5 mm en 5 minutos, sin afectar el rendimiento de la aeronave ni los instrumentos de comunicación. Se hace necesario utilizar los sistemas antiengelamiento y se recomienda no permanecer en esa situación por un periodo superior a una hora.

**Moderado.** El hielo acumulado alcanza los 50 mm en 5 minutos, reduciendo hasta un 15 % la velocidad de la aeronave y generando vibraciones con una posible pérdida de efectividad en los sistemas de comunicación. Además de usar los sistemas antiengelamiento, se requiere un cambio de altitud.



**Severo.** El hielo supera los 50 mm acumulados en 5 minutos, lo cual reduce hasta el 25 % la velocidad de la aeronave y afecta drásticamente los sistemas de control. Ello causa fuertes vibraciones, pérdida de potencia y avería de los sistemas de comunicación. Los sistemas antiengelamiento pocas veces funcionan, así que lo más recomendable es cambiar la altitud de inmediato.

El engelamiento se considera una situación crítica para la aeronave. Las tripulaciones no deben esperar a tener una confirmación visual de engelamiento. Antes de acumularse en los planos –donde es visible a la tripulación–, en la mayoría de los casos el engelamiento se forma primero en el empenaje<sup>20</sup>.

Otro aspecto que se debe considerar sin tener en cuenta el tipo de engelamiento es si se está volando en una zona de riesgo, en cuyo caso la tripulación deberá considerar en primera instancia cambiar la altitud de la aeronave, es decir, salir de esa condición de riesgo. Cuando se está en tal situación, siempre es aconsejable disminuir la altura si las regulaciones aéreas y topografía lo permiten; de otra manera, podría considerar aumentar la altura. Las dos opciones son válidas.

## 8.5 Tipos de hielo en los que se manifiesta el engelamiento

**Hielo claro (*clear ice*).** El hielo claro se forma principalmente entre 2 °C y -10 °C. En este tipo de hielo, las gotas no se congelan inmediatamente –al hacer contacto con la aeronave–, sino que fluyen sobre la superficie, de tal manera que su congelamiento gradual les permite desplazarse inclusive dentro de la estructura interna de la aeronave. Su alta densidad y dificultad para desprenderse hace que sea calificado como el tipo de hielo más peligroso para las operaciones aéreas.

**Hielo opaco, granular o cencellada (*rime ice*).** Tiende a formarse con temperaturas inferiores a -15 °C. Al ser de congelación rápida, atrapa aire formando capas de hielo fáciles de romper (Eichenberger, 1996). Se acumula principalmente en las zonas externas y bordes delanteros de la aeronave. Se considera el más común y menos peligroso.

**Hielo mixto.** Es una mezcla del hielo opaco y claro que puede presentarse en cualquier rango de temperaturas. Su grado de peligrosidad está ubicado entre el hielo opaco y el claro, igual que su dificultad para desprenderse de la estructura de una aeronave. Normalmente, se presenta con temperaturas entre -10 y -15 °C.

La FAA (s.f.) vinculó el tipo de hielo con un rango específico de temperaturas que facilitan su formación. A diferencia del tipo de hielo, la intensidad del engelamiento no se encuentra solamente encasillada en un rango de temperaturas, sino que depende también del tiempo de exposición al fenómeno y del contenido de agua líquida presente en la atmósfera. Politovich (1989) realizó un estudio de condiciones favorables para que

20 Parte posterior de la aeronave compuesta por el estabilizador vertical y horizontal.






se presentara el engelamiento y concluyó que el rango de temperaturas más favorable se encuentra entre 0° y -20 °C, en especial en el rango de -5,5° a -9,4 °C.

Al realizar una aproximación de la intensidad de engelamiento teniendo como base los rangos de temperatura que la FAA asoció a los tipos de hielo, y bajo el principio que la peligrosidad del tipo de hielo le permitiría a la aeronave permanecer menos tiempo en esa condición, se lleva a cabo una aproximación práctica de la intensidad del engelamiento con la temperatura (tabla 14).

118

**Tabla 14.** Temperatura promedio según la intensidad de engelamiento y tipo de hielo.

Intensidad del engelamiento		Tipo de hielo	Temperatura promedio
	severo	claro	0 -10 °C
	moderado	mixto	-10 a -15 °C
	ligero	opaco	-15 a -20 °C

Nota:  
 \*La intensidad del engelamiento depende realmente del rango de temperatura, el contenido de agua líquida y el tiempo que la aeronave se ha expuesto al fenómeno.  
 \*Las tres intensidades de engelamiento pueden presentarse con cualquier tipo de hielo.

Fuente: elaboración propia.

## 8.6 Engelamiento en la aeronave

El engelamiento es el fenómeno meteorológico más peligroso para la aviación. Por ello, los aterrizajes, descensos, virajes, etc., deben realizarse con un amplio margen de seguridad, conscientes de la disminución de los mínimos operacionales.

Dependiendo de la clasificación del engelamiento y el tipo de hielo, la aeronave podría experimentar cualquiera de los siguientes inconvenientes:

- Aumento de resistencia por modificación del perfil aerodinámico.
- Aumento de consumo de combustible debido al peso extra causado por el engelamiento.
- Daños en los mecanismos de comando y control de la aeronave.
- Daños estructurales a la aeronave.
- Deterioros en las antenas.
- Falla en los instrumentos de control.



- Pérdida de sustentación.
- Pérdida de potencia, convertida en pérdida de velocidad y altitud.
- Pérdida de tracción en hélices.
- Disminución de visibilidad en cabina.
- Vibraciones.

### 8.6.1 Engelamiento de los bordes de ataque y cola

Lo que hace al engelamiento un verdadero peligro para la aviación es el efecto que produce sobre el borde de ataque de una aeronave, toda vez que modifica directamente el perfil aerodinámico, lo cual afecta gravemente la sustentación, aumenta la resistencia al avance y hace insostenible el vuelo.

Al ser de rápida congelación, el hielo opaco normalmente se acumula en una zona cerca del borde delantero donde los sistemas antiengelamiento lo pueden desprender. Su composición lo hace poco eficaz para perturbar el flujo del aire.

Por otra parte, el hielo claro es muy difícil de remover, y su acumulación progresiva causa una modificación al perfil alar que interfiere directamente con el flujo normal del aire y permite la formación de pequeños remolinos alrededor del borde de ataque que serán los encargados de crear zonas de turbulencia y la posterior pérdida de sustentación (figura 52).



**Figura 52.** Interacción entre el tipo de hielo y el flujo de aire. Adaptado de FAA (2015).

**Fuente:** elaboración propia.

### 8.6.2 Formación de hielo en hélices

Las hélices están constantemente expuestas a la fuerza centrífuga inducida por su rotación. Al adherirse hielo a estas superficies, se causa un inevitable desbalanceo en el sistema, lo cual produce fricción, vibraciones y disminución de la propulsión. También suele perderse la sincronía con los motores, se aumenta el peso y se disminuye la eficiencia aerodinámica.



Para combatir el hielo en las hélices es muy común encontrar sistemas *anti-icing* y *de-icing* dependiendo de si actúan antes o después de la formación del hielo. Un completo análisis del funcionamiento de estos sistemas en las hélices puede ser consultado en López (2012).

---

### 8.6.3 Engelamiento en el carburador

120

El engelamiento en el carburador es especialmente peligroso porque puede provocar un fallo y apagado del motor por hielo en el motor. Puede llegar a presentarse por:

**Impacto en la entrada de aire del motor.** Se produce cuando las gotas logran filtrarse directamente en el carburador, afectando gravemente al sistema de mezcla.

**Evaporación del combustible.** Al evaporarse el combustible, se absorbe calor para generar un equilibrio térmico que tiene como consecuencia un descenso de la temperatura. Al descender la temperatura, se produce saturación y la humedad presente puede convertirse en hielo, el cual queda atrapado dentro del carburador.

Se puede intuir formación de hielo en el carburador mediante una súbita pérdida de potencia y un mal funcionamiento del motor. En aviones con hélices de paso fijo, el mal funcionamiento se notará en la caída de las revoluciones por minuto (rpm), mientras que en hélices de paso variable (de velocidad constante) puede verse con la caída de presión del colector<sup>21</sup>.

---

### 8.6.4 Formación de hielo en el tubo Pitot

La formación de hielo en el tubo Pitot causa una incorrecta medición de la presión dinámica del flujo de aire, lo cual afecta directamente la información suministrada por el velocímetro. La mayor parte de las aeronaves cuentan con un sistema de calentamiento en el tubo Pitot que les permite activarlo cuando se vuela en zonas de baja temperatura.

---

### 8.6.5 Incidentes causados por engelamiento en la FAC

Las tripulaciones han sufrido el engelamiento de una forma silenciosa; normalmente no lo reportan y superan el fenómeno usando los sistemas *anti-ice*. Los datos estadísticos provienen de accidentes graves donde la vida de los tripulantes se ha visto comprometida. Se destacan los siguientes casos:

**AC-47T FAC1650 (30/AGO/1988).** La aeronave se encontraba cerca de la intersección ANAME en la ruta Apiay (Meta) – Neiva vía A-301, W-16 con 16 000 ft de altitud, cuando la tripulación informó al controlador de Apiay del mal tiempo y formación de hielo. La aeronave fue encontrada en el Páramo de las Mercedes (04 07 00 N 73 58 00 W), departamento de Cundinamarca, totalmente destruida.

**SR-560 FAC 5763 (15/JUL/08).** Saliendo del aeródromo Los Cedros (Antioquia) y realizando un vuelo de reconocimiento, la tripulación informa que están bajo una condición de engelamiento a 40 000 ft de altitud y la palanca de potencia está paralizada.

**SR-560 FAC 5747 (7/SEP/10).** La aeronave despegó del aeródromo El Dorado (Bogotá) a las 22:24 horas con el fin de realizar un vuelo de reconocimiento a 21 000 ft de altitud.

---

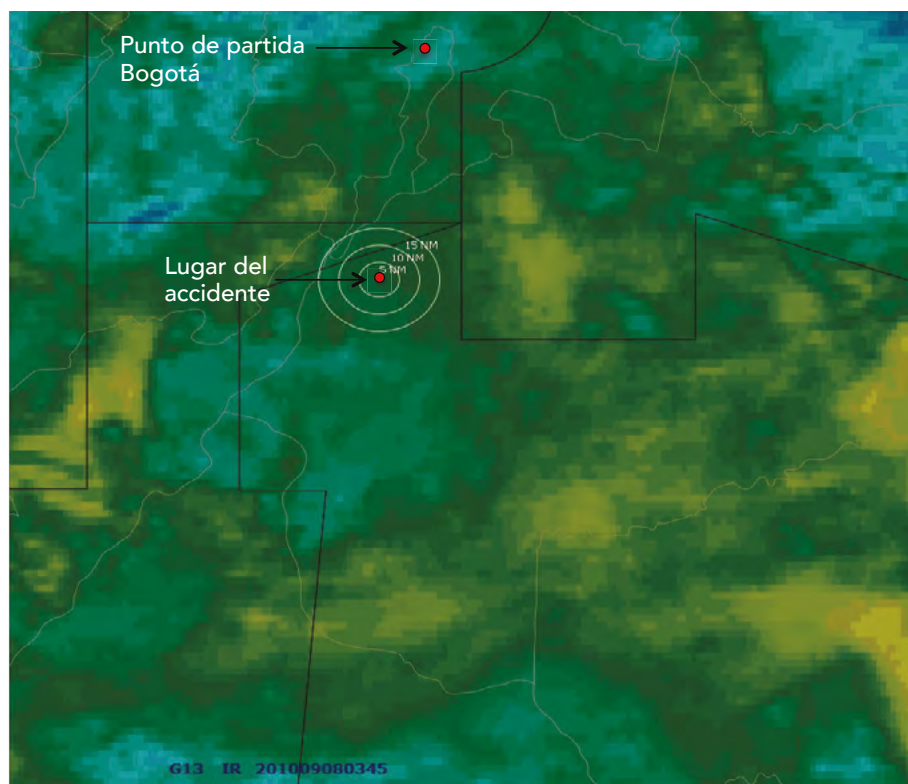
<sup>21</sup> Instrumento encargado de regular la mezcla de aire-combustible en el motor.



A las 23:03 horas entra en pérdida habiendo mencionado con antelación que tenían presencia de hielo. La aeronave es encontrada en el Cerro Gramalote (Meta) completamente destruida.

La figura 53 corresponde a la situación meteorológica de ese día y hora, en la cual se evidencia que en la ruta de la aeronave y el patrón de reconocimiento ejemplificado con círculos de 5, 10 y 15 NM, presentaban nubes en las capas bajas y medias de la atmósfera con gran contenido de humedad. Aunque la tonalidad de color amarillo representa las formaciones convectivas más fuertes, las condiciones meteorológicas de la zona y la continua rotación de la aeronave sobre un mismo punto y nivel pudieron contribuir con el trágico accidente.

121



**Figura 53.** Imagen infrarroja que muestra las condiciones atmosféricas del 5/SEP/10 a las 22:45 horas y la ruta de vuelo del FAC 5747.

**Fuente:** elaboración propia. La imagen satelital fue tomada del Sistema de Información Meteorológico de la FAC y modificada para mostrar el punto de partida y lugar del accidente aéreo.

Con el fin de evitar posibles nuevos accidentes por causas relacionadas con engelamiento, el 23 de septiembre de 2010 la FAC emitió la alerta 17 con las siguientes instrucciones para las tripulaciones:

- *Activar las botas desheladoras apenas se encuentren con condiciones de engelamiento, a menos que el manual de vuelo específicamente lo prohíba.*

- *Si el manual del avión o su equivalente especifica que se debe esperar a la acumulación de hielo antes de activar las botas desheladoras, los pilotos deberán mantener una vigilancia estrecha de los cambios en velocidad y cualquier cambio de las características del vuelo.*
- *Mientras las condiciones de hielo existan, los pilotos deberán operar continuamente las botas desheladoras, ya sea automática o manualmente.*
- *Apague o use de manera limitada el piloto automático para detectar rápidamente los posibles cambios en las características de vuelo de la aeronave.*

En la misma alerta, la FAC describe algunos de los factores propicios para que se presente el engelamiento y realiza una descripción del problema. Aquí se relacionan algunos de ellos:

*La presente ALERTA se origina como resultado de accidentes aéreos por la aplicación de juicios incorrectos durante la operación de las aeronaves, por condiciones de inseguridad, estrés, personalidad, ego o temperamento, sumiendo riesgos innecesarios durante la operación aérea.*

*Una cantidad tan pequeña como 6,35 mm de acumulación de hielo en el borde de ataque puede incrementar las velocidades de pérdida entre 25 y 40 kt; el peligro radica en que esta acumulación es mínima y puede ocasionar una falsa confianza en los pilotos.*

*La pérdida de control súbita es posible con una acumulación de 6,35 mm de hielo en el borde de ataque a las velocidades de aproximación típicas.*

*El uso del piloto automático puede enmascarar los cambios en las características de vuelo de los aviones y puede ser un precursor de la pérdida de control o de la entrada en pérdida.*

*Muchas aeronaves requieren aún hoy en día que el piloto reconozca visualmente la formación de hielo en las alas y su grosor para determinar la activación de los sistemas de control, a pesar que puede ser difícil observarlo desde la cabina.*



# Capítulo 9.

## Peligros meteorológicos – cizalladura

---

- 9.1 Alturas favorables para el wind shear
- 9.2 Clases de wind shear
- 9.3 Situaciones que originan el wind shear
- 9.4 Mecanismo de wind shear sobre la aeronave
- 9.5 Efectos del wind shear sobre la tripulación
- 9.6 Acciones de la tripulación frente al wind shear
- 9.7 Instrumentos de medición

Ésta es la segunda causa de siniestralidad meteorológica en aviación, con un 26 % de los casos (Moreno y Gil, 2003); a diferencia del engelamiento, la tendencia ha disminuido. Esta positiva evolución se debe a un conocimiento más amplio de los factores que lo producen, a la progresiva instalación de instrumentos como el *Low Level Windshear Alert System* (LLWAS) para detectar el fenómeno y a las mejoras en la predicción, pero sobre todo a un mayor conocimiento y experiencia de las tripulaciones.

En términos aeronáuticos, la cizalladura es más conocida por su nombre en inglés (*wind shear*) y se manifiesta con fuertes cambios en la dirección o velocidad del viento en distancias cortas. Se le considera peligrosa porque actúa en las fases más críticas del vuelo (despegue y aproximación), dejando muy poca distancia vertical para que la tripulación estabilice nuevamente la aeronave y logre sortear la emergencia sin que se produzca un accidente aéreo.

## 9.1 Alturas favorables para el *Wind Shear*

---

Se genera en niveles muy bajos que oscilan entre 1 500 y 6 000 ft, en los que a medida que la altura es menor, la situación se torna más peligrosa y se dificulta controlar los cambios bruscos de altitud a los que está sometida la aeronave. Según el manual de investigación de accidentes de la FAC (1989), cuando el *wind shear* se presenta a una altura de 200 ft o superior, el 89,5 % de los intentos se logran recuperar en forma segura, mientras que por debajo de esa altura sólo se recuperan el 66,7 % de las aeronaves. Bajo esas características, se definieron 200 ft como una altura crítica para recobrar la aeronave de forma segura; es allí donde el piloto debe estar más consciente del riesgo.

## 9.2 Clases de *Wind Shear*

---

El *wind shear* puede presentarse de manera horizontal (HWS) o vertical (VWS), siendo esta última la más peligrosa y representativa, en especial porque tiene implícito el cambio de altitud de la aeronave frente al terreno. Durante el despegue o aproximación, la aeronave opera con la velocidad mínima por encima de la velocidad de pérdida, por lo que un cambio drástico en la velocidad del viento puede provocar una pérdida de sustentación.

Toda aeronave requiere una velocidad mínima para mantener la sustentación, la cual depende del rendimiento de la aeronave y de la velocidad relativa del aire. En la fase de aproximación, la tripulación siempre escoge la cabecera de pista con viento en contra para maximizar la sustentación, así que cualquier perturbación en el flujo de aire puede inducir un accidente aéreo.



## 9.3 Situaciones que originan el *Wind Shear*

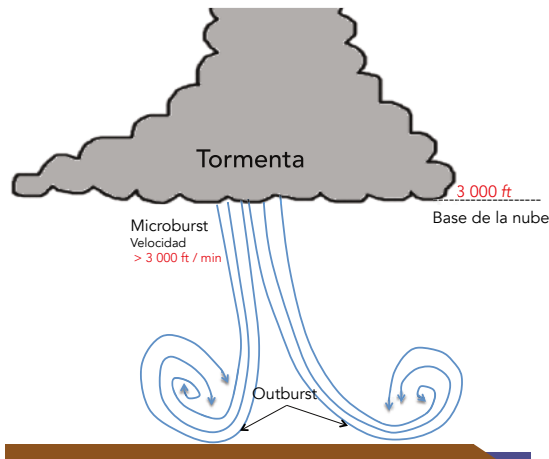
El *wind shear* es causado principalmente por nubes de desarrollo vertical tipo torrecúmulos y cumulonimbos; no obstante, según Ledesma y Baleriola (1993), también puede generarse por:

125

- Corrientes en chorro (jet stream).
- Los vientos alisios y brisas de mar o de montaña.
- Rozamiento en la capa límite planetaria<sup>22</sup>.
- Obstáculos (montañas, edificios, etc).
- Chorros de bajo nivel<sup>23</sup> altitudinal.

Dado que el *wind shear* generado por tormentas es el más importante y peligroso, se enfatizará en este caso. Las fuertes diferencias de temperatura dentro de la tormenta causan fuertes ráfagas descendentes localizadas en la parte baja y central de la tormenta.

Estas fuertes ráfagas se dividen principalmente en dos escalas dependiendo del diámetro de cubrimiento: la mayor de 2,5 millas se considera macroráfaga (macroburst) y la menor microráfaga (microburst), siendo esta última la más peligrosa porque su corto diámetro le permite alcanzar altas velocidades. Según FAA (1988), un microburst podría generarse por una nube de tormenta con una base de hasta 15 000 ft AGL, pero típicamente proceden de tormentas con alturas de hasta 3 000 ft AGL y superan velocidades de 3 000 ft/min en el centro de la tormenta (figura 54). Al impactar el microburst contra el terreno, se extienden con violencia (outburst) y afectan las zonas aledañas a la tormenta.



**Figura 54.** Microburst y outburst producidos por nubes de desarrollo vertical.

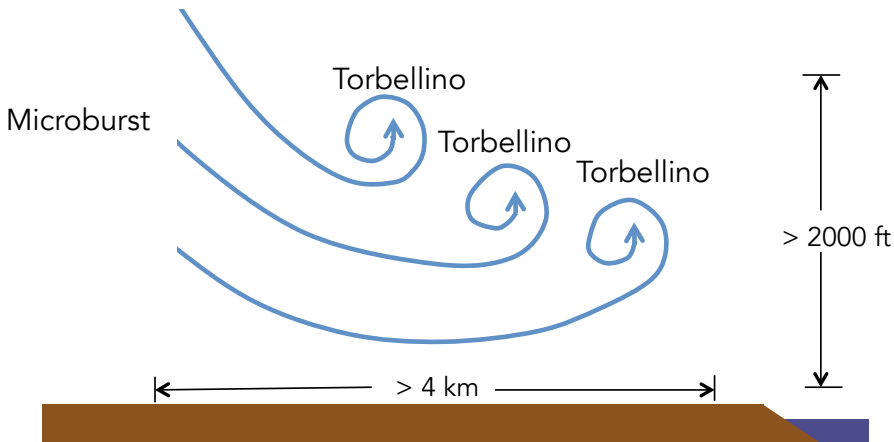
**Fuente:** elaboración propia.

22 La capa límite planetaria es la distancia entre superficie y una altura variante donde la fricción del terreno ya no causa efecto.

23 Los chorros de bajo nivel son corrientes de aire por debajo de los 10 000 ft.

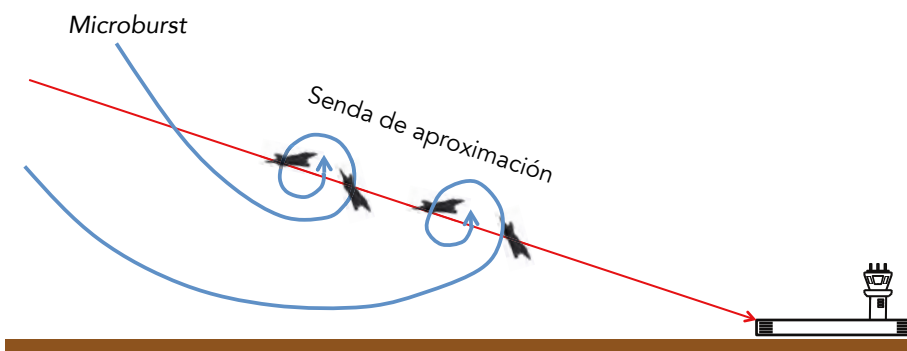
La FFA (1988) indica que el *outburst* puede originar una serie de torbellinos (vórtices) de eje horizontal que se extienden por más de 4 km y alcanzan una altura superior a los 2 000 AGL (figura 55). Estos torbellinos también generan fuertes ráfagas de viento que podrían alcanzar distancias de hasta 15 km y causar cambios de dirección del viento de hasta 180° (FAA, 2008). Si una aeronave se ve expuesta a un evento de *wind shear*, debe prepararse para sufrir más de un cambio de altitud.

126



**Figura 55.** Dimensiones aproximadas de los torbellinos horizontales producidos por el microburst.  
**Fuente:** elaboración propia.

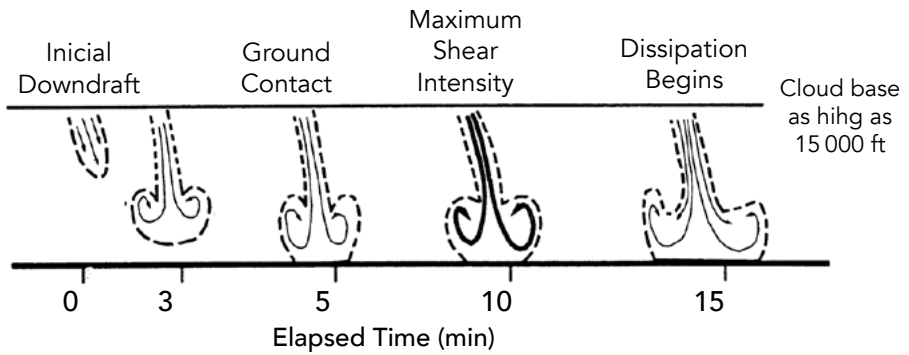
Una aeronave en aproximación final puede encontrar este sistema de torbellinos y quedar influenciada a peligrosos ascensos y descensos (figura 56). Como se mencionó anteriormente, la cercanía de la aeronave a la velocidad de pérdida la hace especialmente vulnerable a cambios bruscos en el régimen de vientos.



**Figura 56.** Peligro de los torbellinos horizontales en la fase de aproximación de una aeronave.  
**Fuente:** elaboración propia.

La figura 57 muestra el tiempo de vida de un evento de *wind shear*, el cual es relativamente corto. Normalmente, pierde su efecto entre 10 a 20 minutos después de que el *microburst* toca tierra; es especialmente peligroso transcurridos los primeros 10 minutos del fenómeno (FAA, 1988).





**Figura 57.** Evolución del corte vertical de un microburst.  
**Fuente:** Tomado de la FAA (1988).

## 9.4 Mecanismo de *Wind Shear* sobre la aeronave

Si el viento cambiara lentamente de velocidad o dirección, la velocidad de la aeronave se adaptaría fácil y paulatinamente a las nuevas condiciones. Los problemas se producen cuando la aeronave no puede adaptarse al nuevo régimen de viento, el cual puede causarse por:

**Ráfaga descendente o ascendente.** Depende de la altitud y la proximidad al centro de la tormenta: cuanto más cerca se encuentre la aeronave de la base de la nube, se enfrentará a más intensidad de la corriente. Una corriente descendente causa una reducción del ángulo de ataque, lo que resulta en una reducción de la sustentación y altera el equilibrio de las fuerzas que actúan sobre la aeronave, dificultando a la tripulación mantener la trayectoria de vuelo.

**Ráfaga de frente.** El incremento de viento de frente o el descenso de viento de cola incrementan las indicaciones de velocidad y causan un aumento transitorio de la sustentación. Cuando esto ocurre, la aeronave se eleva repentinamente de su senda de aproximación o despegue.

**Ráfaga de cola.** Se produce con la disminución repentina del viento de frente o con el aumento brusco del viento de cola. La aeronave sufre una disminución en la velocidad y, por lo tanto, una repentina pérdida de sustentación acompañada con una brusca pérdida de altura.

Mientras que a gran altura se dispone de espacio suficiente para que la tripulación realice las maniobras necesarias para contrarrestar estas fuerzas, a baja altura estos eventos podrían finalizar en un accidente aéreo. También existen ráfagas que afectan el costado de las aeronaves, lo cual provoca efectos de desequilibrio en el alabeo<sup>24</sup> y facilita el impacto de alguno de los planos con el terreno.

24 El alabeo es el movimiento de la aeronave respecto a su eje longitudinal.





## 9.5 Efectos del *Wind Shear* sobre la tripulación

---

128

Según el manual de investigación de accidentes de la FAC (1989), se ha definido que el piloto experimenta cuatro fases durante un evento de *wind shear*: de reconocimiento, de reacción, de estabilización y de ascenso. El mismo manual define las dos primeras así:

### **Fase de Reconocimiento**

*Inicialmente, la conciencia del piloto está centrada en mantener la velocidad y la senda de planeo para continuar el aterrizaje. Cuando la aeronave es alcanzada por un wind shear, el piloto siente que algo anda mal con la aeronave y evalúa la situación; esta evaluación toma tiempo. El momento de comprensión de este trabajo mental es el momento de reconocimiento del wind shear, esto puede notarse por un definido movimiento de la aeronave nariz-arriba como resultado de la reacción sicomotora del piloto.*

### **Fase de Reacción**

*La siguiente tarea del piloto es realizar un pull-up tan pronto le sea posible. Por consiguiente, el estado mental del piloto en sus procedimientos debe ser reemplazado por otro completamente diferente. Ejemplo, una maniobra de escape de wind shear es completamente diferente a la ley de control normal, porque el piloto debe olvidar las velocidades de referencia prescritas.*

*El tiempo promedio de reconocimiento es de aproximadamente 5,48 s y el promedio de reacción es de 5,43 s. Pérdida de altura -92,9 ft durante la fase de reconocimiento y -96,5 ft durante la fase de reacción. Como resultado, se considera que en promedio el piloto necesita aproximadamente 11 s y 200 ft de altura disponibles para realizar una reacción segura al experimentar un wind shear. Parecía que el tiempo de reconocimiento prolongado era el resultado de la excesiva adherencia de los pilotos en continuar la aproximación. El tiempo de reconocimiento del wind shear es directamente proporcional a la demora en el cambio de decisión para rechazar una aproximación de aterrizaje.*

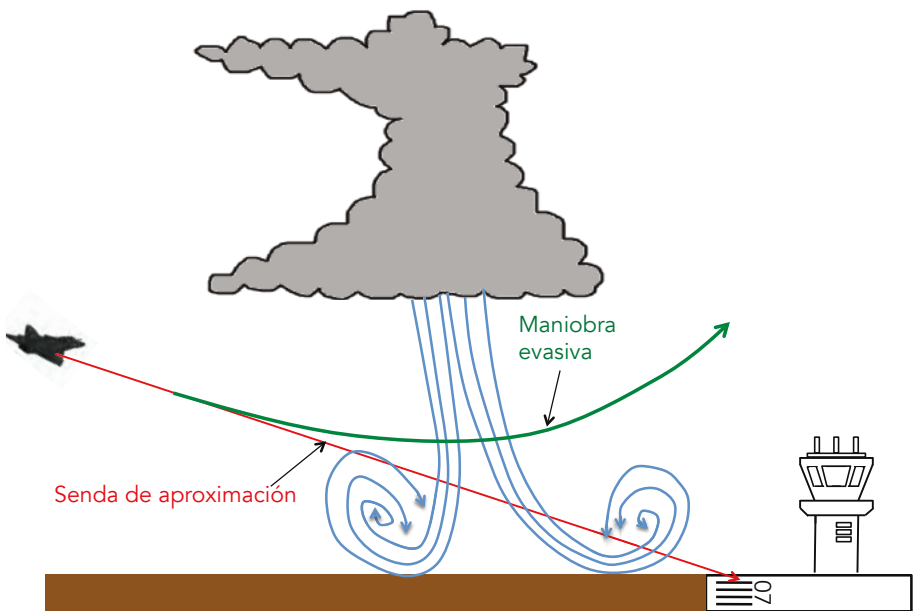
*Se presentaron algunas características comunes en todas las recuperaciones seguras realizadas: tiempo no prolongado de reconocimiento (2,7 – 8,2 s), pérdida de velocidad de -7 a -12 kt, agresivo pull-up usando régimen de pitch entre 2 a 4 grados / segundo, recobrada usando elevado actitud de pitch en rangos entre +18 a +29 grados de nariz arriba. Es altamente inaceptable para un piloto sin entrenamiento en wind shear permitir pérdidas de velocidad por debajo de las velocidades de referencia usadas en las operaciones diarias.*



## 9.6 Acciones de la tripulación frente al *Wind Shear*

129

Cuando una tripulación se enfrenta a un evento de *wind shear*, la primera línea de defensa, la más recomendada y la más segura, es evitarlo y esperar como mínimo 20 minutos antes de intentar un nuevo despegue o aproximación (figura 58).



**Figura 58.** Primera regla para enfrentar un evento de *wind shear*.

**Fuente:** elaboración propia.

Después de analizar muchos de los accidentes registrados en todo el mundo, se encontraron pruebas de que en la mayoría de los casos los pilotos aceptaron el riesgo o no evaluaron el estado del tiempo con el fin de reconocer los factores meteorológicos asociados al fenómeno. Estos son:

**Formación de nubes de desarrollo vertical en los alrededores.** Si la tripulación logra una identificación visual de nubes de desarrollo vertical o si se enteran por informes de los ATS, deben aumentar la alerta situacional y evitar maniobras de aproximación y despegue durante el tiempo que dure el fenómeno. La figura 59 muestra un claro ejemplo de formación de nubes de desarrollo vertical en el base aérea de Melgar (CACOM-4), donde a pesar de que el aeródromo se encontraba operando en condiciones visuales, las nubes de desarrollo vertical del sector presentaban un riesgo para las operaciones aéreas y se cumplían las condiciones esenciales para la presencia del *wind shear*.

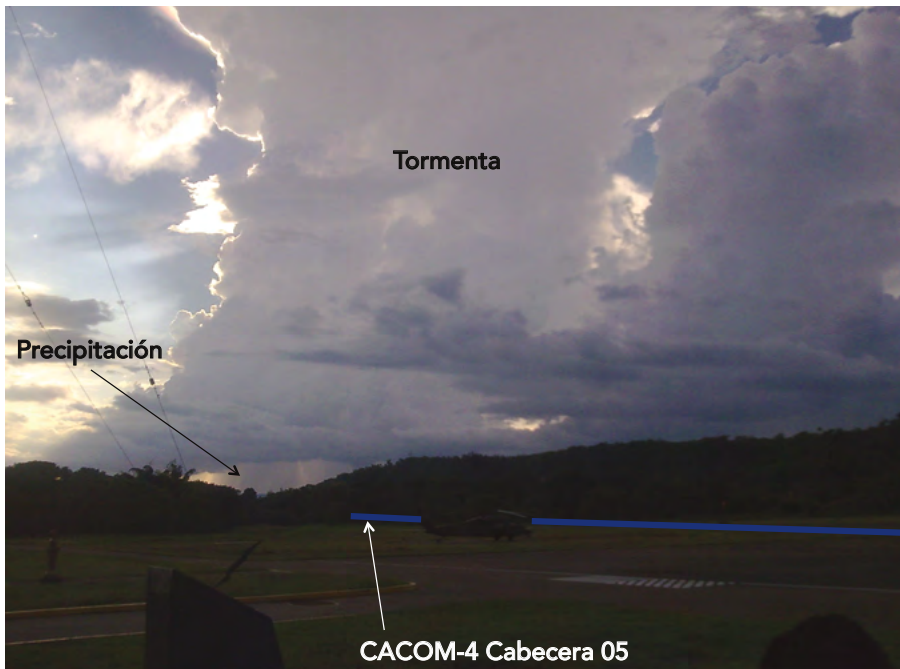


Figura 59. Nubes de desarrollo vertical en las inmediaciones del aeródromo de CACOM-4.

Fuente: elaboración propia.

**Presencia de precipitación o virga<sup>25</sup>.** Estos hidrometeoros pueden estar vinculados a una nube de desarrollo vertical y pueden alertar a las tripulaciones de su presencia.

**Actividad convectiva.** Se asume que existe convección con la presencia de nubes tipo cúmulos. El evento de *wind shear* podría presentarse si hay señales de convección y sobre todo si el aire es muy caliente y seco (FAA, 1988). Estos parámetros pueden consultarse fácilmente en el METAR de cada aeródromo; allí es posible observar las diferencias entre la *temperatura* y la *temperatura del punto de rocío*.

Si la tripulación decide continuar con el vuelo o desprevenida se ve enfrentada a un evento de *wind shear*, debe estar preparada para la fase de reacción o recuperación, la cual consiste en la capacidad para volver a una condición de vuelo después de sufrir una perturbación.

Para maniobrar la aeronave, la tripulación debe controlar y estabilizar los ejes transversal, longitudinal y vertical, a los cuales corresponden los movimientos de cabeceo, balanceo y guiñada, respectivamente. En una perturbación causada por un evento de *wind shear*, la atención debe centrarse sobre el movimiento de cabeceo.

El cabeceo se controla por la actitud o ángulo de ataque, al cual le corresponde una velocidad relativa indicada equivalente que le provee cierta estabilidad en velocidad. Esto significa que una aeronave tiende a cabecear hacia arriba para disminuir la velocidad relativa y hacia abajo para aumentar o recuperar la velocidad relativa perdida.

<sup>25</sup> Agua que se evapora antes de llegar a superficie. Normalmente se identifica por su apariencia de velo y tono grisáceo.



Según contempla la FAA (1988), en la mayoría de los accidentes causados por *wind shear* la tripulación redujo el *pitch* (cabeceo en español) por debajo de lo que debería, así que las técnicas de recuperación deberían encaminarse al control del mismo. En general, la FAA recomienda:

### En el despegue

- Utilizar la máxima potencia disponible.
- Minimizar las reducciones de actitud de cabeceo.
- Utilizar la pista más larga disponible.
- Usar la configuración de *flaps* recomendada para su aeronave.
- Utilizar una mayor velocidad de rotación<sup>26</sup>.
- Mantener o incrementar la altura de pitch hasta 15° de inclinación.
- Aceptar velocidades más bajas a lo normal.
- No sobrepasar la velocidad de pérdida.

### En la aproximación

- Minimizar las reducciones de potencia.
- Utilizar la pista más adecuada.
- Usar la configuración de *flaps* recomendada para su aeronave.
- Utilizar una mayor velocidad de aproximación.
- No sobrepasar la velocidad de pérdida.
- Mantener la configuración existente para no agravar la situación.

## 9.7 Instrumentos de medición

En los últimos años se han implementado varios métodos de medición del *wind shear*. En el caso de Colombia, por ejemplo, la UAEAC ha explorado la posibilidad de utilizar los radares meteorológicos instalados en San Andrés, Corozal y el Tablazo como sensores de medición de este fenómeno. Al ser radares Doppler, tienen la capacidad de realizar escaneos por debajo de los 2 000 ft dentro del área de cobertura de los aeródromos y, mediante un algoritmo, calculan las variaciones en velocidad y dirección del viento, emitiendo alertas gráficas y sonoras a los ATS.

<sup>26</sup> Velocidad en la cual la aeronave comienza a levantar el morro y se prepara para abandonar la pista.



Aunque en Colombia aún no se ha instalado ningún sistema LLWAS, éste parece ser una buena opción para enfrentar la *wind shear*. El sistema LLWAS está diseñado para detectar microrráfagas en las inmediaciones de la pista y *cizalladuras* de baja altura. Normalmente, está compuesto por una serie de sensores de velocidad y dirección del viento instalados entre 15 a 30 m de altura que, junto a la información suministrada por el radar, alerta la presencia de *wind shear*. La figura 60 muestra un ejemplo de cómo funciona un sistema LLWAS.

132

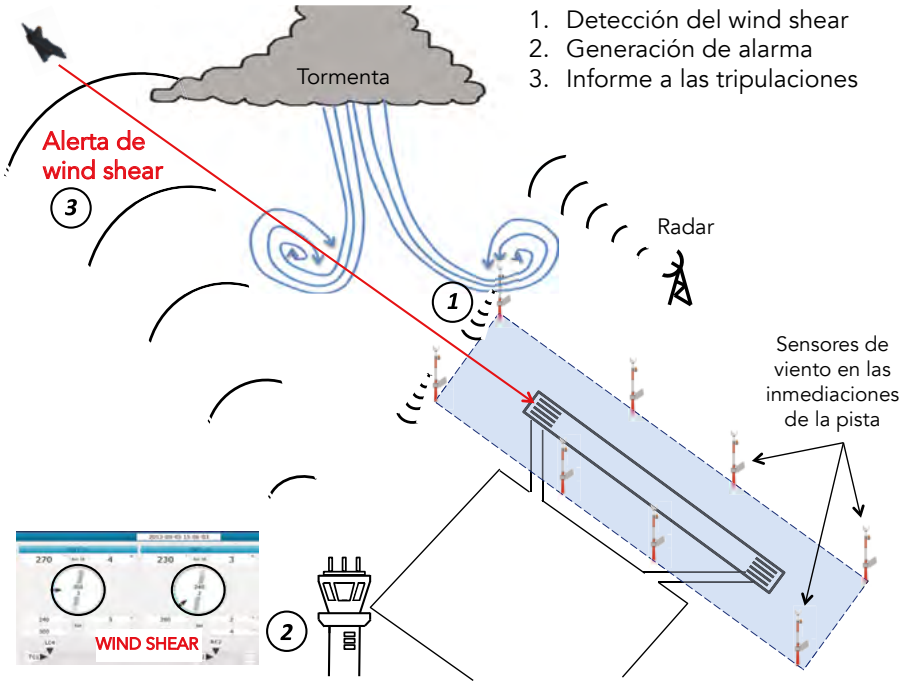


Figura 60. Sistema de alerta de *wind shear* LLWAS compuesto por varios sensores de viento en los alrededores de la pista y un radar meteorológico.

Fuente: elaboración propia.



# Capítulo 10.

## Peligros meteorológicos – turbulencia

---

- 10.1 Turbulencia según su origen
- 10.2 Clasificación de la turbulencia
- 10.3 Áreas donde la turbulencia es más común
- 10.4 Vuelo sobre montaña
- 10.5 Caso de estudio

134

La turbulencia es la tercera causa de siniestralidad meteorológica en aviación con un 15 % de los casos (Moreno y Gil, 2003), y la primera causa de daños y lesiones en pasajeros y tripulación en accidentes que no finalizan en un resultado fatal. Invisible, imprevisible y difícil de detectar, la turbulencia ha causado daños en muchas partes del mundo. La turbulencia consiste en la aparición de movimientos aleatorios en el flujo de aire que provoca la formación de remolinos y afecta gravemente el normal desarrollo del vuelo causando molestias, fracturas y shock nerviosos sobre los pasajeros y tripulaciones.

Aeronáuticamente, la turbulencia se define como el movimiento irregular de una aeronave en vuelo, especialmente cuando se caracteriza por un movimiento rápido hacia arriba y hacia abajo, causado por una variación rápida de las velocidades del viento atmosférico (American Meteorological Society, s.f.b).

Cuando un avión vuela rápidamente desde una corriente a otra, experimenta cambios bruscos en la aceleración, así que un desplazamiento más lento causará cambios de aceleración más escalonados. Como consecuencia, la primera regla para volar en una zona con turbulencia, es reducir la velocidad de acuerdo a los límites y recomendaciones de cada aeronave para atravesar zonas de turbulencia (FAA, 2007).

Entre otros factores que contribuyen al aumento o disminución de la turbulencia en la aeronave se encuentran su tamaño, peso, superficie alar, velocidad, actitud y posición de la aeronave frente al flujo de aire. A mayor peso de la aeronave, menor turbulencia; si los planos son más largos, mayor turbulencia; el ángulo de los planos menos susceptible a la turbulencia es el delta; y, finalmente, si la aeronave se encuentra entrando o saliendo de una corriente en chorro, encontrará mayor turbulencia.

Si la superficie terrestre fuera completamente lisa y la atmósfera estable, el viento sería completamente laminar y fluiría con velocidad usualmente constante. Pero dado que en la superficie terrestre se encuentra todo tipo de obstáculos y la atmósfera es inestable, el flujo normalmente es turbulento. La diferencia entre *cizalladura* y *turbulencia* es que esta última contempla una amplia gama de escalas espaciales y temporales (American Meteorological Society, s.f.a.), y, consecuentemente, tiene implícita la cizalladura. La cizalladura, por el contrario, no siempre es turbulenta, sobre todo en gran escala.



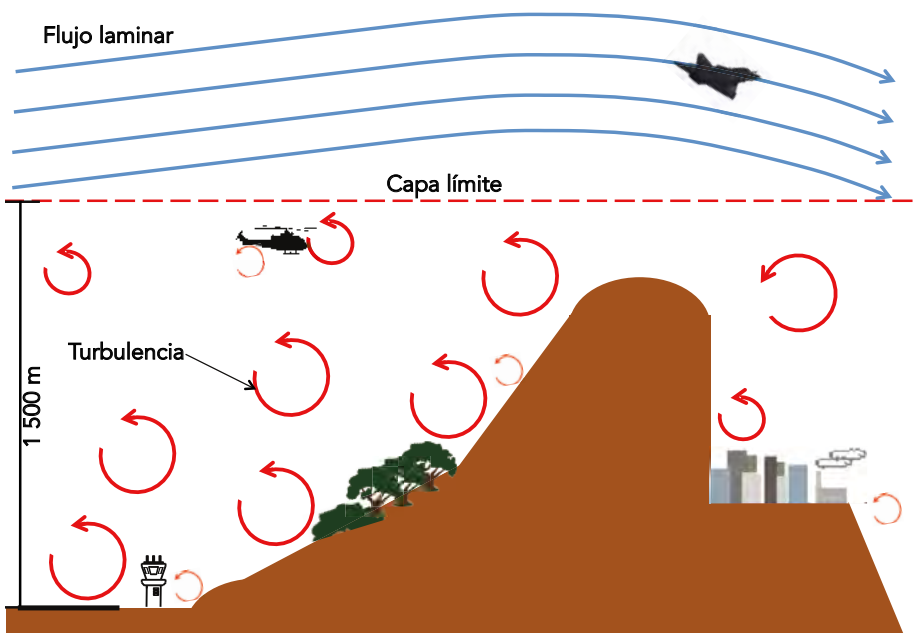
# 10.1 Turbulencia según su origen

## 10.1.1 Turbulencia mecánica

135

La turbulencia mecánica está ligada a la irregularidad del terreno y es considerada una interacción entre la superficie terrestre y el flujo de viento entre los primeros 1 000 a 2 000 m. Ruiz (2002) encontró que en Bogotá esta capa turbulenta, estimulada por el rozamiento del aire con los obstáculos y la orografía, origina remolinos que podrían llegar a afectar hasta los 1000 m de espesor e IDEAM y DAMA (2001) determinaron que podría extenderse hasta 1 500 m según la zona del país.

Cuanto más irregular es la superficie y más elevada es la velocidad, se aumentará la intensidad de la turbulencia. Dependiendo de la velocidad del viento y de la estabilidad del aire, los remolinos turbulentos serán transportados en cortas o largas distancia. Mientras que el aire estable permite la formación de remolinos de pequeña escala los cuales se disipan lentamente, el aire inestable genera remolinos de mayor escala pero de fácil y rápida dispersión (figura 61).



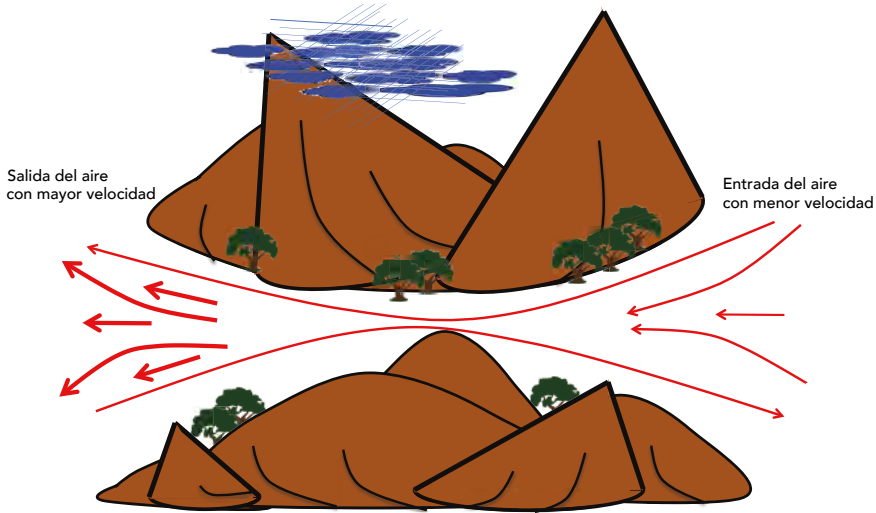
**Figura 61.** Turbulencia mecánica.

**Fuente:** elaboración propia.

Los obstáculos también pueden llegar a causar el *efecto venturi* o *de embudo*, el cual consiste en la presencia de vientos fuertes en la sección más angosta del valle (figura 62).



Sin embargo, en los procesos atmosféricos no suele presentarse esta situación por la falta de una barrera en la parte más alta del flujo. Al contrario, en una situación más real, los vientos tienden a intensificarse en la salida de la canalización. La rápida expansión del aire denso que alcanza la salida causa una rápida caída de la presión atmosférica y origina un gradiente de presión entre la entrada y la salida de la canalización que aumenta la velocidad del flujo de aire, produciendo a su vez turbulencia por velocidad.



**Figura 62.** Efecto venturi en la sección más angosta vs. salida de la canalización.

**Fuente:** elaboración propia.

Para calcular la velocidad del flujo canalizado en la salida del flujo, la University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) presenta un buen ejemplo de esta situación en el módulo vientos canalizados (MetEd, 2014) «viento canalizado», en donde se ejemplifica un flujo sin fricción a través de una canalización de igual elevación. La ecuación relaciona la aceleración a través de una canalización, así:

Ecuación del viento canalizado:

$$\frac{(vel.salida)^2}{2} = \frac{(vel.entrada)^2}{2} + \frac{(pres.entrada - pres.salida)}{(densidad\ del\ aire)}$$

Ejemplo: Determinar la velocidad de salida conociendo que la densidad del aire es equivalente a 1,2 kg/m<sup>3</sup>, la presión de salida es 1 008 mb y la velocidad del viento y presión en la entrada de la canalización son 5 m/s (~10 kt) y 1013 mb respectivamente.

Como 1 mb es igual a 1 hPa, 1 013 mb son iguales a 1 013 hPa.

$$\frac{(vel.salida)^2}{2} = \frac{(5\ m/s)^2}{2} + \frac{(1\ 013\ hPa - 1\ 008\ hPa)}{(1,2\ kg/m^3)}$$

Esto implica una disminución de presión a través de la canalización de 5 hPa.

$$\frac{(vel.salida)^2}{2} = \frac{(5\ m/s)^2}{2} + \frac{(5\ hPa)}{(1,2\ kg/m^3)}$$



Conociendo que 1 hPa = 100 Pa, Pa = N/m<sup>2</sup>, N = J/m y J = kg m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>

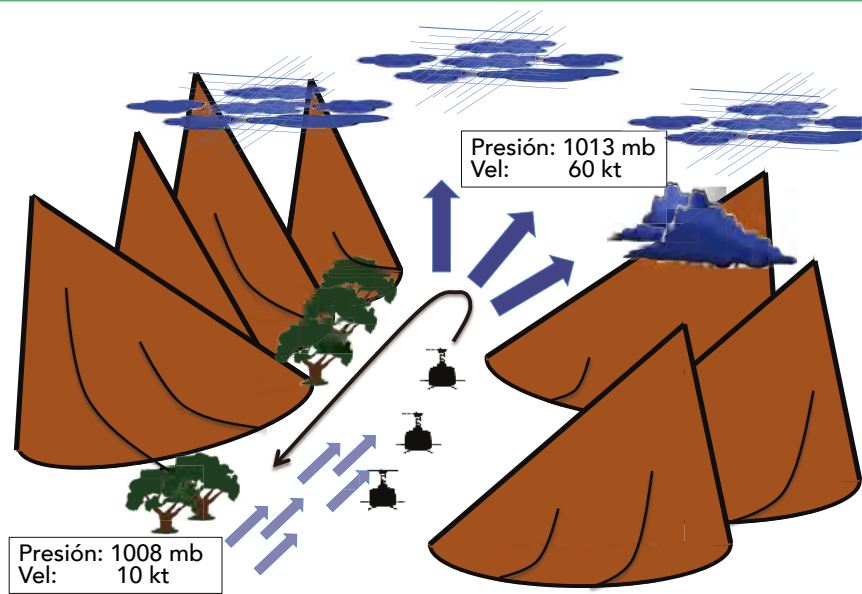
$$\frac{(\text{vel.salida})^2}{2} = \frac{25 \text{ m}^2/\text{s}^2}{2} + \frac{500 \text{ m}^2/\text{s}^2}{1,2}$$

$$\frac{(\text{vel.salida})^2}{2} = 12,5 \text{ m}^2/\text{s}^2 + 416 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 429 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$(\text{vel.salida})^2 = 2(429,5 \text{ m}^2/\text{s}^2) = 858 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$(\text{vel.salida})^2 = \sqrt{858 \text{ m}^2/\text{s}^2} = 29,2 \text{ m}^2/\text{s}^2 \approx 60 \text{ kt}$$

El resultado muestra que el viento, en ausencia de fricción, puede alcanzar 29,2 m/s en la salida de la canalización, casi 60 kt. Por lo tanto, si una aeronave sobrevuela un valle estrecho a baja altura, o a la salida del mismo, y se encuentra de frente con una tormenta, no debería intentar cruzarlo, en ese caso, es recomendable dar vuelta atrás y dirigirse al aeródromo de salida o su alterno, tal cual como lo muestra la figura 63.



**Figura 63.** Peligros causados por efecto Venturi, canalización del flujo y salida de la canalización.  
Fuente: elaboración propia.

### 10.1.2 Turbulencia térmica o convectiva

La turbulencia térmica es el resultado de tres factores: el calentamiento del suelo, el tipo de suelo y el grado de inestabilidad del aire. Al calentarse el aire que se encuentra más cercano al suelo, se vuelve menos denso y asciende adiabáticamente. Estos múltiples ascensos de aire se traducen en corrientes ascendentes que afectarán el normal desarrollo del vuelo (figura 64).



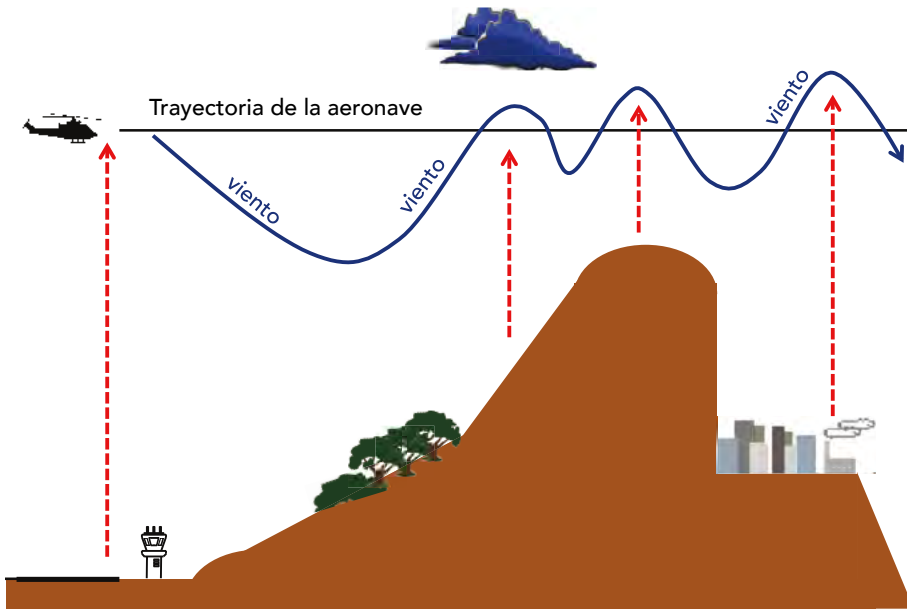


Figura 64. Turbulencia térmica.  
Fuente: elaboración propia.

**Turbulencia térmica en zonas montañosas.** De día, las laderas de las montañas se calientan más rápido que el valle y se genera movimiento ascendente del aire sobre las laderas; de noche el patrón se invierte y se producen movimientos descendentes. Este patrón es ampliamente detallado en el estudio de caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo (IDEAM, s.f.).

Esta dependencia de la temperatura causa nubosidad convectiva en la cima de la montaña en el día, y baja visibilidad en los valles, sobre todo en la madrugada (figura 65).

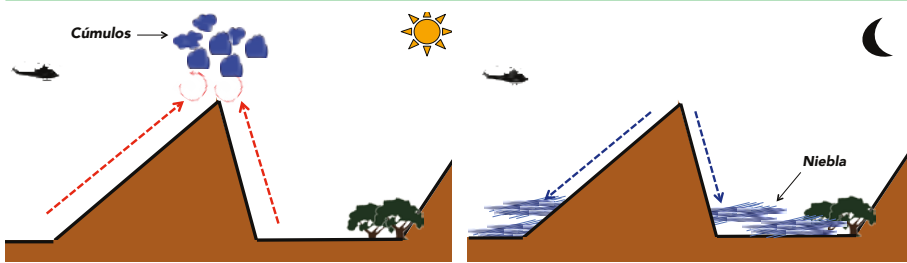


Figura 65. Corrientes diurnas y nocturnas por las laderas de las montañas.  
Fuente: elaboración propia.

### Turbulencia térmica en zonas costeras

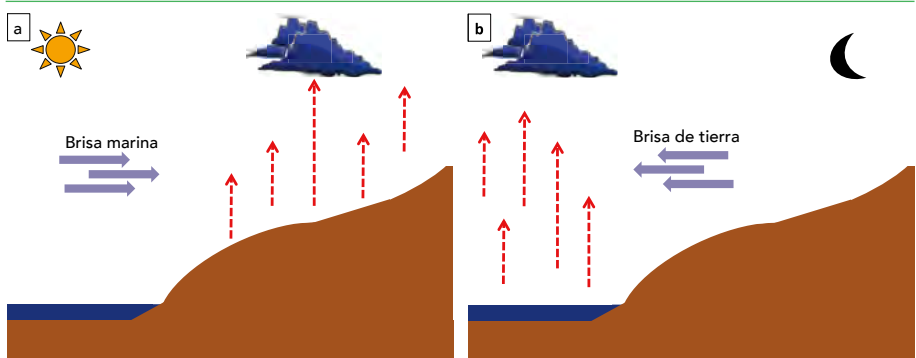
**Brisa marina.** La brisa marina es el resultado de las diferencias de temperatura entre la tierra y el agua. De día el suelo se calienta mucho más rápido que el agua, el aire sobre el suelo se calienta, se vuelve menos denso y asciende; su espacio es ocupado por aire



relativamente más frío procedente de las masas de agua cercanas, creando corrientes de aire que se desplazan del agua hacia la tierra (figura 66a).

**Brisa de tierra o terral.** El terral es el movimiento opuesto a la brisa marina, aquí las masas de aire se desplazan desde la tierra hacia el agua como consecuencia del enfriamiento acelerado que sufre el suelo durante la noche, así que de noche el agua conserva mayor temperatura que el suelo y el aire encima de ella es entonces relativamente más cálido que el aire sobre el suelo (figura 66b).

139



**Figura 66.** Variación del viento en la costa por efecto de la temperatura.

**Fuente:** elaboración propia.

Las tripulaciones de helicóptero son muy susceptibles a este tipo de turbulencia cuando realizan operaciones de extinción de incendios utilizando Bambi Bucket<sup>27</sup> por encontrarse cerca al terreno y con altas diferencias de temperatura entre tierra y cuerpos de agua.

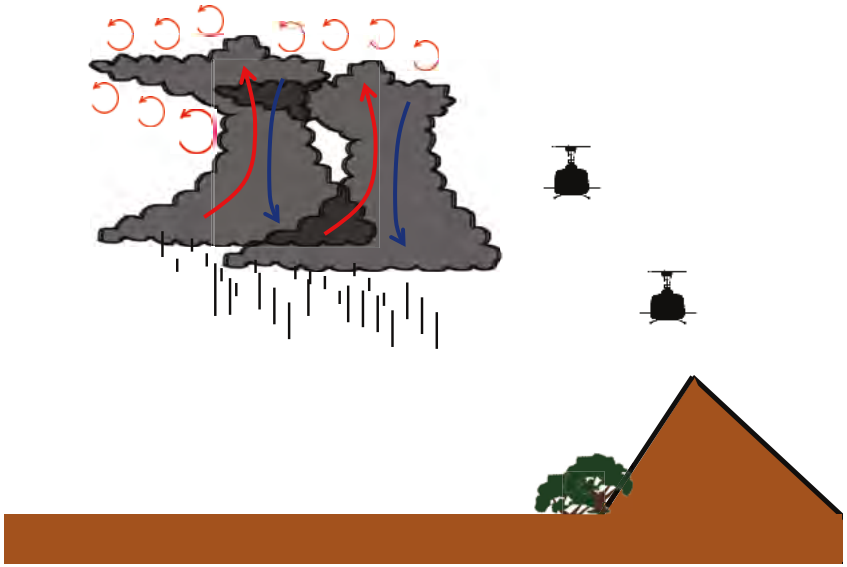
Como caso de ejemplo, el 20 de septiembre de 2012, el B-212 FAC 4003, durante misión de extinción de incendios en fase de despegue, experimentó hundimiento después de cargar agua en el Bambi. La tripulación tomó la decisión de eyectar el Bambi y regresar al Comando Aéreo de Combate N°. 4 en Melgar. La aeronave no presentó daños estructurales y el Bambi Bucket fue sometido a un proceso de evaluación y reparación de posibles daños.

### 10.1.3 Tormentas

Es el único tipo de turbulencia fácil de vislumbrar por la presencia de nubes de desarrollo vertical, las cuales poseen corrientes ascendentes y descendentes en su interior y están rodeadas de zonas turbulentas en su base, sobre su tope y debajo del yunque. Si una aeronave tuviera que enfrentarlas, la recomendación más viable es pasar por el lado opuesto al yunque (figura 67). Estas nubes pueden alcanzar hasta 66 000 ft de altura en el ecuador.

<sup>27</sup> Marca del sistema de extinción de incendios de propiedad de la compañía canadiense SEI Industries, que permite el transporte de un contenedor de agua de gran capacidad por parte de un helicóptero.



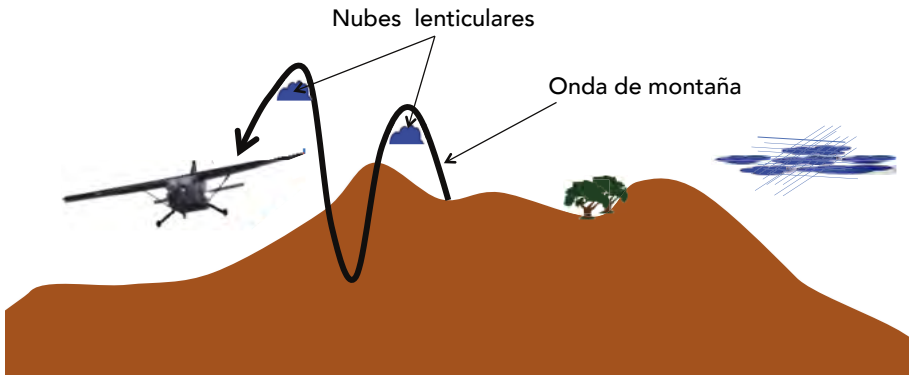


**Figura 67.** La turbulencia por tormenta tiende a ser menor por el lado opuesto al yunque.  
**Fuente:** elaboración propia.

### 10.1.4 Turbulencia por onda de montaña

El piloto debe conocer que la turbulencia está asociada a todo tipo de obstáculos en el flujo del aire y siempre que se vuele muy cerca al terreno se deben asumir corrientes ascendentes por el barlovento y descendentes por el sotavento de las montañas.

Sumado a esto, cuando el viento se enfrenta a una cadena montañosa, se crea sobre el obstáculo mucha turbulencia y el choque abrupto del flujo de aire con el relieve se extiende en forma de onda creando turbulencia. Normalmente estas ondas pueden ser detectadas porque cuando se condensa el vapor de agua, se forman *nubes lenticulares*, las cuales adoptan la forma de la cresta de la onda (figura 68).



**Figura 68.** Turbulencia por onda de montaña.  
**Fuente:** elaboración propia.



### 10.1.5 Turbulencia asociada a corrientes en chorro (*Jet Stream*)

La corriente en chorro tiene asociada turbulencia por cambio de velocidad toda vez que en el centro del chorro la velocidad es más fuerte que las circundantes. Las aeronaves experimentan fuerte turbulencia al entrar o salir del *jet stream* (figura 69a), el cual normalmente está ubicado alrededor de los 34 000 ft, con dirección W – E en latitudes medias e intensidades mayores a 50 kt. No es común encontrar corrientes en chorro (*jet stream*) que alcancen espacio aéreo colombiano; sin embargo, en Colombia se conoce de la existencia de al menos tres *jet de bajo nivel* (inferior a 10000 ft) con intensidades usualmente mayores a 25 kt que podrían estar asociadas a turbulencia leve y moderada (figura 69b).

141

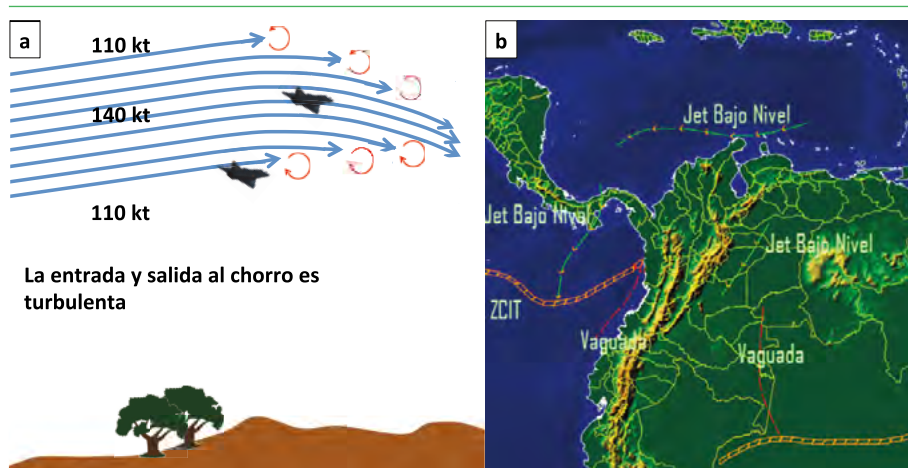


Figura 69. Turbulencia asociada al *jet stream* y *jet de bajo nivel* en Colombia.

Fuente: elaboración propia. Figura 69b tomada del SIMFAC (s.f.)

### 10.1.6 Turbulencia en aire claro

Hay un tipo de turbulencia llamada CAT (*Clear Air Turbulence*) que no está asociada a ningún tipo de nubosidad, dificultando su detección y predicción. Puede ocurrir en un condiciones atmosféricas aparentemente normales y sin ningún tipo de reconocimiento visual.

La CAT normalmente se manifiesta por encima de los 30 000 ft y también puede encontrarse próxima a la altura de la tropopausa, la cual varía según la latitud. Su intensidad puede ser de moderada a extrema según el lugar, las condiciones atmosféricas y la combinación con otros factores meteorológicos.

En una zona CAT, como en toda ocasión que una aeronave experimente turbulencia, se recomienda reducir la velocidad a los valores recomendados para cada aeronave. Esto atenuará los daños que pueda sufrir la estructura de la aeronave y la ayudará a mantenerse más estable.

En Colombia se le ha atribuido a la CAT varios incidentes, uno de ellos se presentó el 21/DIC/2001 a las 17:45 UTC con el HK 3859-X de Intercontinental. Mientras la aeronave



realizaba el vuelo número 8 858 con 6 tripulantes y 22 pasajeros en la ruta Cali – San Andrés, y cuando se encontraba en la fase de descenso, la tripulación advirtió a los pasajeros que estaban pasando por una zona de turbulencia severa. Después del incidente uno de los pasajeros informó que había sufrido un fuerte golpe en la cara y la lesión fue registrada como grave. Aunque no es clara la altitud de la aeronave y no se estableció una causa probable, es posible que se viera enfrentada a la CAT.

## 10.2 Clasificación de la turbulencia

Tabla 15. Clasificación de la turbulencia.

Turbulencia	Velocidad	Efectos sobre la aeronave	Efectos sobre los pasajeros
Ligera	5 – 15 kt	El avión está sometido a oscilaciones muy ligeras de vez en cuando.	Objetos en reposo. Es necesario abrochar los cinturones.
Moderada	15 – 25 kt	El avión es sometido a golpes laterales frecuentes y a un ligero balanceo. Es necesaria una leve acción sobre los mandos	Los pasajeros pueden perder por un instante el contacto con su asiento.
Fuerte	25 – 35 kt	El avión se separa de la línea de vuelo; cabecea, se balancea y está sujeto a movimientos verticales bruscos. Es preciso realizar una fuerte acción sobre los mandos para mantener el equilibrio. El panel de instrumentos vibra y causa confusión al piloto.	Los pasajeros pueden ser lanzados fuera del asiento.
Extrema	+ de 35 kt	El avión se separa con frecuencia y bruscamente de la línea de vuelo, cabecea y se balancea fuertemente. Obedece con dificultad a los mandos.	Los pasajeros son sacudidos violentamente, y sin cinturones de seguridad podrían ser lanzados fuera del asiento. Los objetos son expulsados de un lugar a otro.

Fuente: Modificado de MetEd (2016).

## 10.3 Áreas donde la turbulencia es más común

Tabla 16. Áreas donde es más común cierto tipo de turbulencia.

Tipo	Áreas donde se presenta
Turbulencia ligera	Cerca de montañas con viento < 15 kt
	Inmerso o cerca de nubes cumuliformes
	Cerca de la tropopausa
	En capas bajas con terreno rugoso y viento >15 kt
Turbulencia moderada	Viento perpendicular a la montaña generando ondas de montaña



Instrumento	Áreas donde se presenta
Turbulencia moderada	Viento >50 kt y aeronave alejada de sotavento hasta 500 k
	Viento 25 – 50 kt y aeronave alejada de sotavento hasta 250 km
	En nubes de tipo cumulonimbos
	En capas bajas con terreno rugoso y viento >25 kt
	En terreno plano con ráfagas >50 kt
Turbulencia severa	Viento perpendicular a la montaña generando ondas de montaña
	Viento >50 kt y aeronave alejada de sotavento hasta 250 km
	Viento 25 – 50 kt y aeronave alejada de sotavento hasta 100 km
	Inmerso o cerca de nubes cumulonimbos en etapa de maduración
Turbulencia extrema	En ondas de montaña cerca de la nube rotor
	En tormentas severas, inmerso o cerca de una línea de inestabilidad en donde se presenta ascenso de las capas de aire

Fuente: Modificado de MetEd (2016).

## 10.4 Vuelo sobre montaña

El vuelo sobre montaña es uno de los más complicados porque implica operación continua con el terreno y con los ángulos pronunciados, también hay menor densidad y por lo tanto menor sustentación, incremento de obstáculos naturales que dificultan maniobrar la aeronave y, por supuesto, un incremento significativo de turbulencia.

El vuelo sobre montaña es particularmente importante en la operación de helicópteros, ya que la mayoría de ellos vuelan muy cerca de los límites operacionales. El vuelo en altura y desestimar el efecto tierra<sup>28</sup> generan casi la mitad de los accidentes en helicópteros donde la tripulación pierde la eficiencia del rotor de cola, disminuye la potencia de la aeronave, disminuye la efectividad en las actuaciones aerodinámicas y finalmente se pierde el control de la aeronave.

La recomendación principal del vuelo sobre montaña es alejarse del terreno siempre que sea posible y evitar los ángulos mayores a 30°. Una aeronave que tiene viento de frente o de cola de 40 kt y pasa muy cerca de una pendiente de 30°, podría sufrir corrientes descendentes de hasta el 50 % del viento predominante, es decir, 20 kt (figura 70).

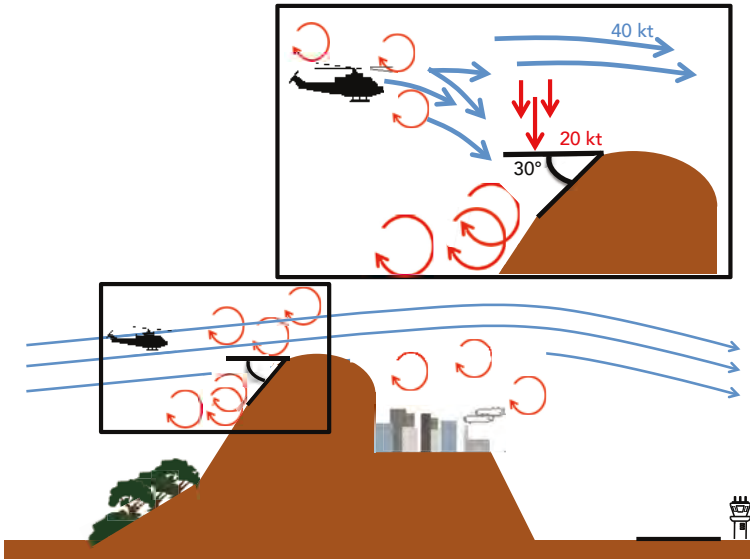
Los helicópteros en la FAC han sido seriamente afectados por los fuertes vientos en condiciones de vuelo sobre montaña, tal como se muestra a continuación:

El B-212 FAC 2170 (19/DIC/86) después de dos horas de vuelo en varias estaciones vulcanológicas del Nevado del Ruiz, se dirigió a Manizales para tanquear, pero un ingeniero de INGEOMINAS que estaba a bordo le solicitó al piloto que los dejara en la estación del Cisne. Durante el aterrizaje fue afectado por fuerte viento del lado izquierdo, que originó hundimiento con potencia, caída de las RPM y, posteriormente, el impacto del helicóptero con el terreno.

<sup>28</sup> El efecto tierra es el fenómeno aerodinámico que provoca alteraciones del flujo de aire cuando una aeronave se encuentra cerca de la superficie, situación que le permite despegar con más carga y utilizar menos potencia.







**Figura 70.** Turbulencia sobre montaña asociada a vientos fuertes y ángulos pronunciados sobre el terreno.  
**Fuente:** elaboración propia.

El B-212 FAC 4221 (28/ABR/88), cumpliendo el tercer vuelo según el itinerario ordenado, se encontraba en final al helipuerto del cerro Pan de Azúcar con 700 lbs de carga a bordo. La tripulación experimentó fuertes ráfagas de viento que afectaron notoriamente el rendimiento del helicóptero, haciendo que este cayera verticalmente una altura aproximada de 5 m, para luego impactar contra el terreno y afectar seriamente las estructuras inferiores y *skids* de la aeronave.

El UH-60 FAC 4107 en el Páramo de Sumapaz (12/FEB/93). El piloto decidió cambiar el área de aterrizaje y la trayectoria final, debido a la amenaza de disparos del enemigo en el área. Próximo al aterrizaje se presentó un descenso brusco quedando por debajo del sitio escogido. El piloto intentó aterrizar sobre la ladera con condiciones adversas significativas, causando que el rotor principal impactara con el terreno.

El UH-1H FAC 4418 en el Cerro La María (26/JUL/93). La aeronave despegó de CACOM-4 a las 11:00 horas. Treinta minutos después y cuando se encontraba en final corta al helipuerto del Cerro La María, fue afectada por ráfagas de viento que la desestabilizó, ocasionando que la nariz golpeará contra el borde del helipuerto y el rotor principal, con el borde del cerro. Como consecuencia, la aeronave giró 180° y rodó por la ladera del cerro expulsando a la tripulación y parando 500 m abajo, causando la destrucción total de la aeronave.

El B-212 FAC 4008 en el Cerro La María (30/JUN/99). En aproximación al Cerro La María, el helicóptero entró en hundimiento, produciendo un aterrizaje fuerte, saliendo inmediatamente a vuelo y golpeando inadvertidamente la parte inferior del *tail boom* contra el spot.



## 10.5 Caso de estudio

El K-350 FAC 5078, a las 15:00 horas, en aproximación al aeródromo de Popayán (14/SEP/12). El ATC del aeródromo le informa al piloto los reportes de viento para la pista 26 en tres ocasiones, mencionando viento entre los 180° y 190° con 17 kt, y ráfagas entre 30 y 35 kt. Durante el aterrizaje, la aeronave hizo contacto fuerte con la pista y salió de nuevo a vuelo, lo que obligó a la tripulación a realizar un procedimiento de motor y al aire, dirigiéndose hacia Cali. Una vez aterrizados en Cali, durante la inspección posvuelo, se encontró que las palas de la hélice del motor derecho presentaban signos de impacto.

145

Una de las recomendaciones de la investigación fue categorizar los vientos cruzados en pistas, de acuerdo con la experiencia de los pilotos, por ejemplo: el máximo componente de viento cruzado admisible para un piloto de K-350 con menos de 100 horas de vuelo sería de 10 kt.

Los reportes METAR del aeródromo de Popayán eran:

SKPP 141600Z 16017KT 8000 FEW020 25/09 A3013 RMK/HZ

SKPP 141700Z 16010G22KT 8000 FEW020 27/08 A3010 RMK/HZ

SKPP 141900Z 19012G25KT 8000 FEW020 26/10 A3005 RMK/HZ

SKPP 142000Z 19013KT 9999 FEW020 XX/XX A3003 RMK/HZ/WS ALL RWY

SKPP 142200Z 200013G24KT 9999 SCT020 22/10 A3005 RMK/HZ/WS RWY 7

De acuerdo a lo anterior, para las 20:00 UTC se presentó viento de los 190° con 13 kt de intensidad. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el viento en el METAR es el promedio de los últimos 10 minutos antes de las 20:00 UTC, a la tripulación se le reporta el promedio de los últimos dos minutos antes de realizar el aterrizaje.

Las condiciones meteorológicas de ese día y hora se presentan en la imagen infrarroja captada por el servicio meteorológico de la Fuerza Aérea Colombiana (figura 71).

De la imagen se puede determinar que en el aeródromo de Popayán (señalado con un círculo rojo) se estaban presentando fuertes diferencias de temperatura, representadas por el color violeta y verde claro, situación que pudo llegar a influir en la presencia de vientos fuertes para ese punto y hora.



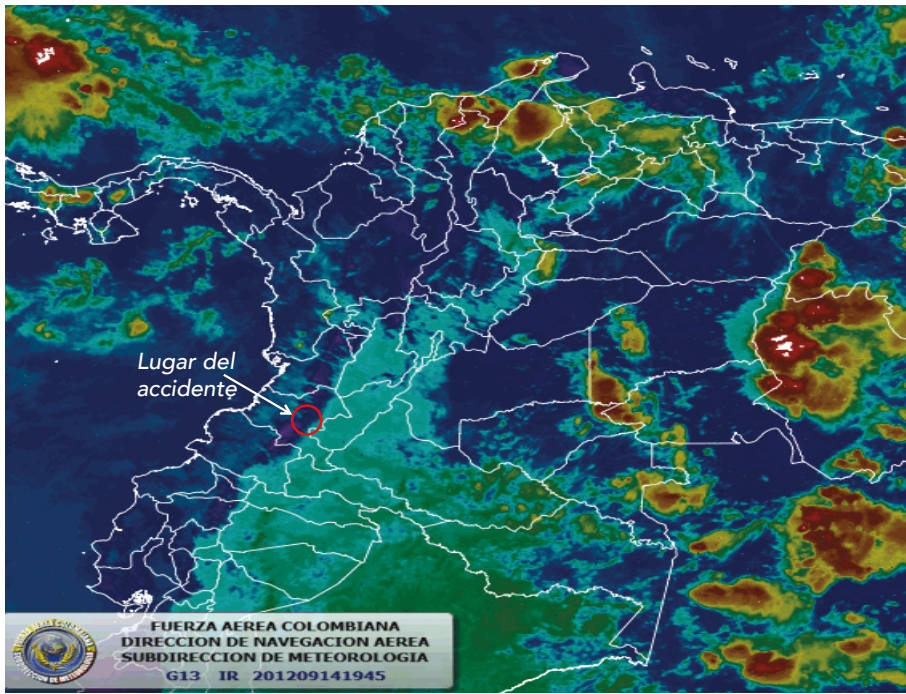


Figura 71. Imagen infrarroja del satélite GOES-13.  
Fuente: Modificada de SIMFAC (s.f).



# Capítulo 11.

## Peligros meteorológicos – baja visibilidad

---

11.1 Visibilidad

11.2 Fenómenos que afectan la visibilidad

11.3 Factores externos que afectan la visibilidad

11.4 Problemas para la aviación

11.5 Caso de estudio

En el estudio de Moreno y Gil (2003), los accidentes aéreos por baja visibilidad representan un 15 % del total, pero con la particularidad de que, a partir de la década de los 80, se ha presentado un fuerte descenso de casos. Esta situación difiere mucho de lo que se presenta en la FAC, en donde este peligro representa el mayor índice de accidentalidad, con un 31 % del total de casos evaluados por fenómenos meteorológicos como factor contribuyente. Casi la totalidad de estos accidentes ocurren en el aterrizaje, en donde la tripulación ha decidido deliberadamente asumir el riesgo de operar por debajo de los mínimos meteorológicos operacionales.

Las operaciones aéreas se realizan siguiendo reglas de vuelo visual (VFR) o reglas de vuelo instrumentos (IFR), dependiendo principalmente del espacio aéreo que se sobrevuele, de los equipos que posee la aeronave, de los equipos instalados en el aeródromo, de las habilidades de la tripulación y, por supuesto, de las condiciones meteorológicas. Se vuela bajo reglas de vuelo VFR cuando la tripulación es responsable de mantener su propia separación con otras aeronaves y con el terreno, para lo cual se requieren condiciones meteorológicas visuales (VMC), de otra manera, si las condiciones meteorológicas están deterioradas, se presentan entonces condiciones meteorológicas de vuelo por instrumentos (IMC) y se debe volar siguiendo las reglas de vuelo IFR. Si las condiciones meteorológicas son VMC, el piloto puede decidir si efectúa su vuelo ajustándose a las reglas de vuelo VFR o IFR, dependiendo también de las restricciones que le imponga el control de tránsito aéreo.

En general, una aeronave volando en condiciones VMC debe mantener una distancia a las nubes de 1 500 m en la horizontal y 1 000 ft en la vertical; y si se encuentra por debajo de 10 000 ft AMSL (Above mean sea level) debe tener una visibilidad mayor a 5 km (UAEAC, 2014).

En una aproximación, los ATS autorizan a la tripulación el cambio de reglas IFR a VFR siempre que el piloto pueda mantener referencia visual con el terreno, a condición de que las condiciones meteorológicas sean tales que razonablemente pueda asegurarse que se completará la aproximación visual y el aterrizaje (UAEAC, 2005). Los pilotos que vuelan en IFR deben en algún punto tener contacto visual con el terreno (ver la pista) y, a partir de ese punto, cambiar de IFR a VFR.

Adicionalmente, se dice que un aeródromo se encuentra por debajo de los mínimos meteorológicos cuando las condiciones meteorológicas no le permite a los ATS garantizar una operación segura, situación que también depende del tipo de aeródromo y de aeronave. Teniendo en cuenta que de acuerdo con UAEAC (2014) se contemplan excepciones, en Colombia no se permite la operación de aeronaves de ala fija si la visibilidad horizontal es menor a 5 000 m o si la visibilidad vertical es menor a 1 500 ft. Sin embargo, para helicópteros, estos mínimos son más flexibles con 1 500 m de visibilidad horizontal y 300 ft de visibilidad vertical.

Como puede notarse, la visibilidad horizontal y vertical es de gran importancia en el mundo aeronáutico, y esta puede verse fácilmente disminuida a causa de la neblina, niebla, calima, humo y precipitación, entre otros fenómenos atmosféricos. El efecto de otros factores secundarios como la ubicación espacial del aeródromo, el tipo y uso de



suelo, la cercanía a cuerpos de agua y la dirección e intensidad del viento, pueden influir notablemente en el aumento o disminución de la visibilidad en un aeródromo.

# 11.1 Visibilidad

Se define como la mayor distancia en una dirección dada a la cual es posible ver e identificar a simple vista un objeto oscuro prominente contra el cielo en el horizonte durante el día, y una fuente conocida de luz moderadamente intensa, preferiblemente desenfocada durante la noche (American Meteorological Society, s.f.d).

La visibilidad depende casi en su totalidad de la cantidad de agua presente en la atmósfera, la cual puede encontrarse en estado sólido, líquido o gaseoso. El aire siempre contiene vapor de agua en menor (aire seco) o mayor cantidad (aire húmedo) determinando de esta manera el grado de humedad. Si el vapor de agua no estuviera presente en la atmósfera, no sería posible la formación de la neblina, niebla, calima, nubes y tormentas.

## 11.1.1 Visibilidad vertical

La visibilidad vertical está directamente relacionada con las nubes presentes en la atmósfera, la cantidad se infiere en octas y la altura en metros o pies, medida desde la base de la nube hasta superficie (figura 72).

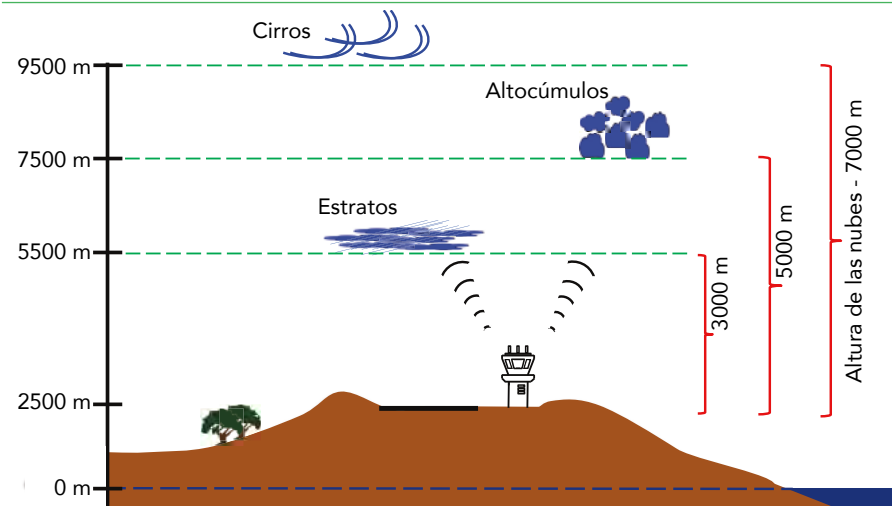


Figura 72. Visibilidad vertical estimada.

Fuente: elaboración propia.

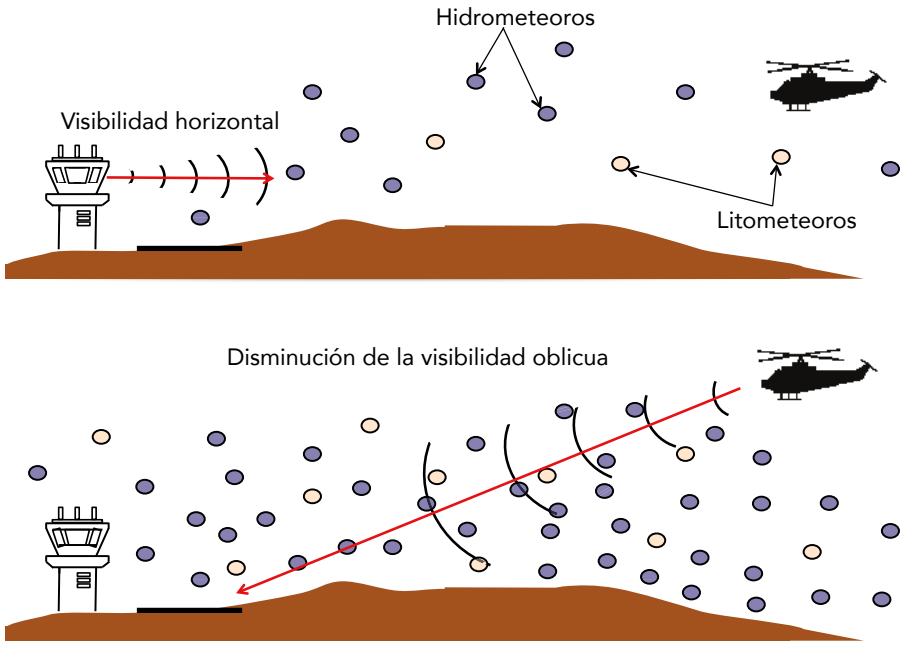
## 11.1.2 Visibilidad horizontal

La visibilidad horizontal se mide en metros y se ve disminuida por la cantidad de hidrometeoros y litometeoros presentes en la atmósfera (figura 73). Durante la noche se



dificulta estimar la visibilidad, porque depende de la cantidad de luz que emite el objeto observado. Los pilotos intentando aterrizar pueden verse enfrentados a la baja visibilidad oblicua o inclinada, definida por la American Meteorological Society (s.f.e) como la mayor distancia a la que se puede percibir un objetivo específico cuando se ve a lo largo de una línea de visión inclinada a la horizontal.

150



**Figura 73.** Visibilidad horizontal y oblicua disminuida por la presencia de hidrometeoros y litometeoros.  
**Fuente:** elaboración propia.

## 11.2 Fenómenos que afectan la visibilidad

Los fenómenos meteorológicos que afectan la visibilidad están resumidos en la tabla 12 del capítulo 7. A continuación se describirán algunos de ellos.

### 11.2.1 Niebla

La niebla es el resultado de la condensación del vapor de agua, presente en la atmósfera en forma de diminutas gotas en suspensión, capaz de reducir la visibilidad de un observador a un objeto ubicado a menos de 1 km de distancia. Está compuesta por diminutas gotas dispersas en el aire, las cuales actúan como interferencia entre el observador y el objeto dificultando la visibilidad. En Colombia, la niebla se forma por enfriamiento y



sucede cuando al disminuir la temperatura del aire este pierde la capacidad de contener humedad y se satura. Este tipo de niebla puede ser dividido a su vez en:

**Niebla de radiación.** Durante la noche el aire en contacto con el suelo se enfría alcanzando con mayor facilidad el punto de saturación y posterior condensación. Este fenómeno se intensifica con días despejados donde la temperatura en superficie puede llegar a ser más baja que lo habitual.

**Niebla de advección.** Se forma cuando una masa de aire húmedo se desplaza sobre una superficie fría, es más común en el mar donde la humedad es alta y, si el viento es menor a 15 kt, no se disipa con facilidad (eventualmente podría presentarse en Colombia).

**Niebla orográfica o de ladera.** Cuando el flujo de aire húmedo es forzado a un ascenso por orografía, este se enfría por expansión adiabática y se condensa, formando la niebla al barlovento de la montaña.

**Niebla de valle.** Como resultado de una inversión térmica, el aire frío queda atrapado en los valles, donde se condensa y genera la niebla.

**Niebla de precipitación.** Las gotas de lluvia que se evaporan antes de llegar al suelo se transforman en vapor de agua que, al enfriarse y alcanzar la temperatura de punto de rocío, dará lugar a la niebla.

## 11.2.2 Neblina

Se diferencia de la niebla por ser menos densa, tiene más dispersas las partículas de agua y permite con mayor facilidad el paso de la luz. Normalmente la neblina le permite a un observador visibilidad mayor a 1 km de distancia, pero inferior a los 5 km. Aunque históricamente se ha utilizado erróneamente el término *bruma* para referirse a la disminución de la visibilidad cuando se mezcla un hidrometeoro y un litometeoro, de acuerdo con el International Meteorological Vocabulary WMO N°. 182 (s.f.), los términos *neblina* y *bruma* son prácticamente equivalentes, así que no debe hacerse ningún tipo de distinción entre estos fenómenos meteorológicos.

## 11.2.3 Calima

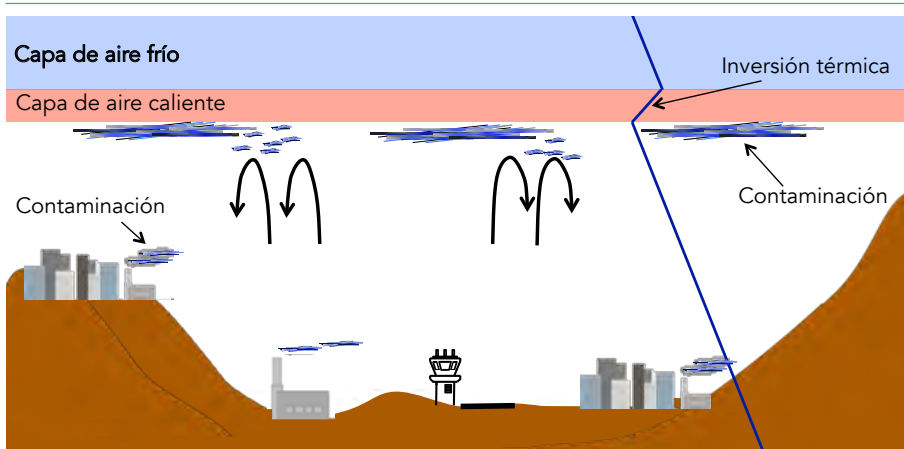
La calima también es conocida en muchas partes del mundo como *calina* y se considera una mezcla de agua con microscópicas partículas sólidas, por lo tanto, este fenómeno meteorológico combina hidrometeoros con litometeoros. Se distingue por su color opaco que hace que las montañas luzcan azuladas, permitiéndole al observador una visibilidad menor a 5 km.

## 11.2.4 Humo

Es clasificado como un litometeoro y está compuesto por diminutas partículas sólidas provenientes de incendios o de la combustión de motores diésel y gasolina. Normalmente ascienden y se dispersan, pero si se presenta una inversión térmica, suelen mantenerse suspendidos en el aire. Cuando el humo se mezcla con niebla es conocido como *smog* (*smoke* + *fog*) o *niebla contaminante*, fenómeno que se presenta principalmente en las grandes ciudades (figura 74).







**Figura 74.** Baja visibilidad por inversión térmica y contaminantes.  
**Fuente:** elaboración propia.

### 11.2.5 Precipitación

Las nubes están formadas por vapor de agua y agua en estado sólido y líquido, que al aumentar de peso precipita hacia la superficie terrestre.

En general, la tabla 17 resume los criterios para clasificar los fenómenos meteorológicos más reportados en los informes aeronáuticos y que disminuyen la visibilidad.

**Tabla 17.** Criterios de clasificación para meteoros que afectan la visibilidad.

Meteoro	Visibilidad	Humedad	Aerosol
Lluvia	< 1 km	100 %	Agua
Llovizna	> 1 km	100 %	Agua
Niebla	< 1 km	90 – 100 %	Agua
Neblina	>1 km y < 5 km	80 – 90 %	Agua
Calima	< 5 km	> 80 %	Agua y Partículas
Humo	< 5 km	< 80 %	Partículas sólidas

**Fuente:** Modificado de WMO (2011).

## 11.3 Factores externos que afectan la visibilidad

El efecto de otros factores secundarios como la ubicación espacial del aeródromo, el tipo y uso de suelo, la cercanía a cuerpos de agua y la dirección e intensidad del viento, pueden influir notablemente en el aumento o disminución de la visibilidad en un aeródromo.



### 11.3.1 El viento

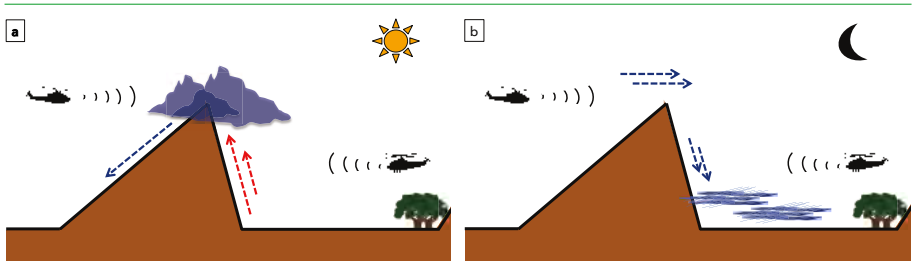
El viento, influenciado por las diferencias de temperatura y las imperfecciones del terreno, interviene notablemente en el mantenimiento, fortalecimiento y disipación de la niebla; así mismo, tanto la dirección como la intensidad del viento intervienen en la formación de niebla. Por lo tanto, el viento es un factor meteorológico que secundariamente contribuye en el aumento o disminución de la visibilidad.

153

De día, el flujo del aire es suficientemente fuerte como para ascender por la ladera y sobrepasar el lado opuesto de una barrera montañosa descendiendo por el sotavento e intensificando la formación de estratos y niebla en la cima de la montaña (figura 75a).

De noche, la atmósfera está más estable, la circulación valle - montaña predomina y el flujo se invierte hacia el valle quedando bloqueado en la parte más baja, incrementando así la presencia de la niebla en el valle (figura 75b).

En Colombia, a medida que la temperatura diaria disminuye, también disminuye el viento pero aumenta la humedad; estas condiciones favorecen la baja visibilidad, sobre todo si el sector se encuentra influenciado por zonas montañosas. A medida que el viento en superficie se incrementa, y dependiendo del tipo de hidrometeoro, se favorecen las condiciones de visibilidad.



**Figura 75.** Baja visibilidad por flujo del viento y disminución diaria de la temperatura.  
Fuente: elaboración propia.

### 11.3.2 Cercanía a cuerpos de agua

Los cuerpos de agua como grandes lagos, mares y océanos proporcionan abundante humedad, contribuyendo a la formación de niebla y estratos sobre el agua o en las costas, según se esté presentando brisa marina o brisa de tierra (consultar capítulo 4 referente al viento).

El proceso de formación de nubes se ve fortalecido en estas zonas debido a la abundancia de núcleos de condensación, como sal en el caso del mar y partículas contaminantes en las ciudades.

### 11.3.3 Características de la superficie

El suelo húmedo y frío, el tipo y textura de la superficie cercana al aeródromo, la ubicación de árboles y edificios que modifiquen el terreno y, por lo tanto, el régimen de vientos, contribuyen al fortalecimiento e intensificación de la niebla.



Las diferencias de temperatura entre la pista, la rampa y sus alrededores está dada de día por el albedo de cada superficie y de noche, por su capacidad calorífica; consecuentemente, la niebla normalmente se formará primero en las inmediaciones del aeródromo donde el albedo es más bajo, cubriéndolo paulatinamente (figura 76).

154

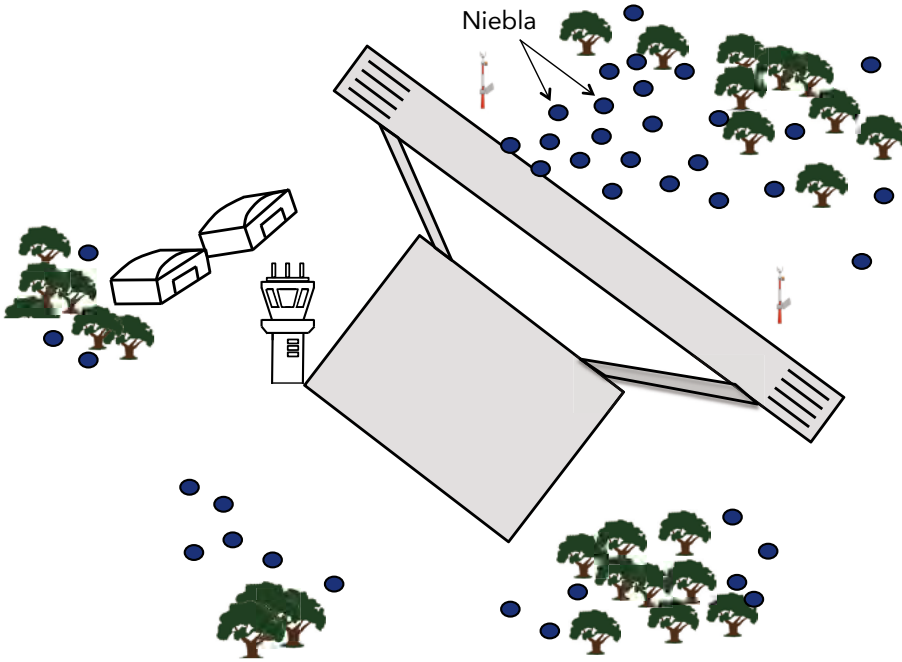


Figura 76. Niebla por humedad y tipo de superficie.

Fuente: elaboración propia.

## 11.4 Problemas para la aviación

La baja visibilidad afecta las operaciones aéreas en la fase de aproximación y despegue al verse las aeronaves obligadas a realizar maniobras muy cerca al terreno. Esta decisión de aterrizar puede darse por factores como escasez de combustible por mala planeación, presión por cumplir la misión, cansancio, afán por llegar al destino, demostrar un falso sentido de valor, exceso de confianza, etc.

Tener problemas de baja visibilidad en los aeródromos colombianos no es una situación compleja. Al contrario, las condiciones de humedad y posición geográfica facilitan la formación de diferentes fenómenos reductores de visibilidad, razón por la cual se han realizado diferentes investigaciones en esta materia.



Para el caso de CACOM-5 en Rionegro (Antioquia), Aguilar A. & G. León (2004) realizaron una aproximación a un modelo de pronóstico de niebla de radiación, donde determinaron que el modelo era capaz de predecir el fenómeno con un porcentaje de acierto de 76 % si se hacía con tres horas de antelación y del 53 % si se hacía con seis horas de antelación. El estudio realizado entre el 2001 y 2002 también clasifica la hora de inicio de la niebla de acuerdo a la tabla 18.

**Tabla 18.** Hora inicio niebla en el aeródromo de Rionegro.

Meses	Hora inicio
Enero	5:00
Abril, junio, julio, agosto, octubre, noviembre, diciembre	6:00
Marzo, mayo, septiembre	7:00
Febrero	8:00

**Fuente:** Tomado de Aguilar A. & G. León. 2004.

Según Aguilar A. & G. León (2004), las condiciones más representativas para la formación de la niebla de radiación en el aeropuerto José María Córdova son: viento en calma, ausencia de nubosidad significativa, intensa radiación solar durante el día y alto contenido de humedad relativa en la atmósfera.

Para el caso de CACOM-1 en Puerto Salgar (Cundinamarca), Jiménez G. & J. Zea (2005) determinaron que, en el periodo de 1996 a 2002, la reducción de visibilidad fue causada en un 48,79 % por calima, 21,51 % por llovizna y 13,72 % por lluvia.

El estudio concluyó, además, que la calima se presentaba en el primer trimestre del año de 07:00 a 10:00 cuando el viento estaba en calma y la temperatura del aire en superficie era baja y se contaba con humedad relativa entre el 75 % y 95 %.

Por otra parte, la cartilla de prevención de accidentes CFIT<sup>29</sup> (*Controlled Flight Into Terrain*) y ALA<sup>30</sup> (*Approach and Landing Accident*) de la FAC han analizado varios casos, y han encontrado que algunas tripulaciones deciden asumir el riesgo, vuelan por debajo de los mínimos meteorológicos visuales, continúan el vuelo a pesar de las condiciones meteorológicas adversas y violan los mínimos meteorológicos en aeródromos de operación VFR.

Uno de los aeródromos más complejos, donde la baja visibilidad afecta las operaciones aéreas, es en el CACOM-6, la Base Aérea de Tres Esquinas (Caquetá). Allí, el 04 de diciembre de 2000, un C-212 cruzó la estación con el fin de establecer básico izquierdo para la pista 24 y las condiciones meteorológicas eran desfavorables. Durante el básico el avión entró en IMC y perdió referencia visual, la tripulación trató de ubicar la cabecera sin resultado, lo que ocasionó un CFIT a 2,5 NM de la Unidad.

La figura 77 muestra un ejemplo de un accidente aéreo donde, para ahorrar tiempo y combustible, la tripulación pasa de IFR a VFR sin percatarse que están operando por debajo de los mínimos meteorológicos visuales.

29 CFIT es el término utilizado en investigación de accidentes para decir que la aeronave funcionaba perfectamente y que fue conducida por la tripulación de una forma inadvertida contra un obstáculo.

30 ALA es el accidente que ocurre entre el marcador exterior y el aterrizaje, incluye el CFIT, pérdida de control, aterrizaje largo, salida de pista y aproximaciones desestabilizadas.



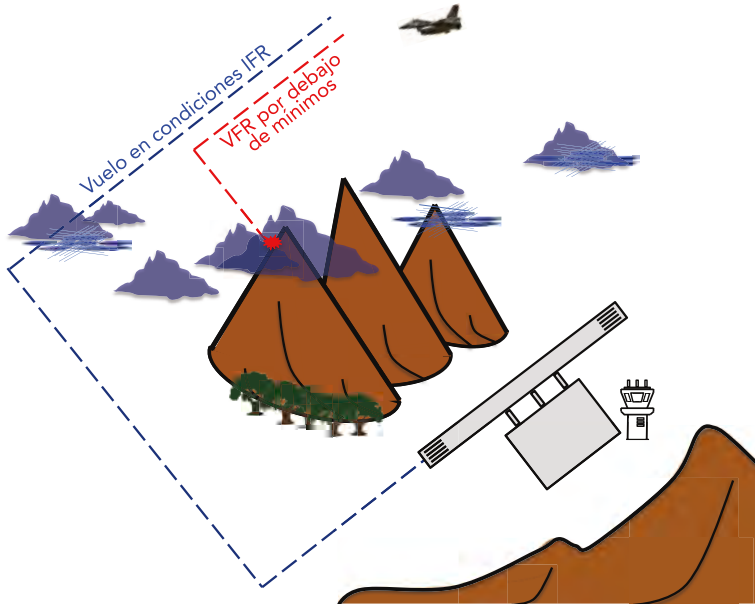


Figura 77. Accidente aéreo por baja visibilidad en el aterrizaje.

Fuente: elaboración propia.

Las tripulaciones de helicópteros están aún más expuestas a las malas condiciones del tiempo, vuelan en permanente contacto con el terreno, muy por debajo de la altitud mínima en ruta (MEA). Cuando la visibilidad disminuye por fenómenos meteorológicos, las tripulaciones deben ascender hasta la MEA. El incumplimiento de este procedimiento puede poner en riesgo la tripulación y la aeronave (figura 78).

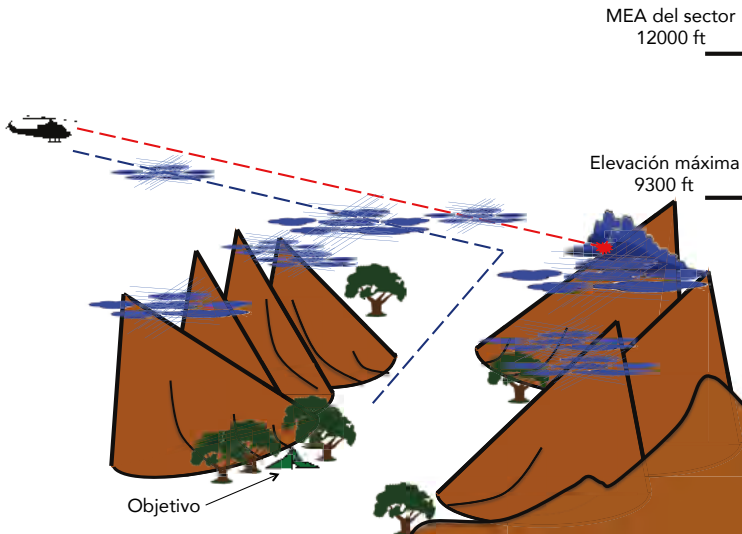


Figura 78. Accidente aéreo por volar debajo de la MEA con poca visibilidad.

Fuente: elaboración propia.



Como se mencionó anteriormente, la baja visibilidad ha causado la mayor tasa de incidentes y accidentes en la FAC, en los que se ha considerado la meteorología como factor contribuyente. A continuación se describen algunos de los casos:

CESSNA 402 FAC 5530 en el cerro Filo Azul, Tame – Arauca (26/SEP/87). La aeronave se encontraba en una misión de relevo de tripulaciones con la ruta MGR – CCO – SUA – APY – MGR a 6 500 ft. El último contacto de la aeronave se registró en el tramo Carimagua – Saravena. A partir de las 19:00 UTC no se registró otro contacto. Aunque la aeronave impactó en el cerro Filo Azul con causa indeterminada, las imágenes satelitales permitieron observar la presencia de varias zonas de tormenta sobre el sector y el tope de las nubes fue estimado entre 45 000 y 55 000 ft.

157

F-28 FAC 1140 en el cerro Montañitas, Caquetá (28/MAR/93). La tripulación despegó de SVC hacia FLA con la información de que el aeródromo se encontraba cerrado y con la intención de que mejoraran las condiciones en el transcurso del vuelo. Cuando llegaron al radiofaro, el controlador le notificó que el aeropuerto continuaba en el mismo estado y que en el área del básico izquierdo, el techo se encontraba alto; por esta razón el piloto procedió a esa zona sin tener condiciones visuales adecuadas, y, creyendo estar alineado con la pista, viró a final en condiciones alternadas de vuelo, lo que ocasionó el impacto con el terreno inadvertidamente.

PC-6 FAC 1112 en Taraira – Vaupés (24/JUN/93). La aeronave se encontraba en vuelo de transporte de Mitú hacia Taraira; después de reportar mal tiempo y nubes bajas, procedió por La Pedrera que era la mejor entrada, reportó en básico y no volvió a comunicarse. Durante la aproximación visual a Taraira en condiciones meteorológicas adversas, el avión inadvertidamente impactó con Cerro Rojo, ubicado en el básico a la pista.

C-212 FAC 1152 en La Macarena – Meta (09/SEP/95). La aeronave despegó a las 11:30 UTC en la ruta VVC – LMC – VVC. La aeronave cruzó sobre el aeródromo de La Macarena en sentido Norte–Sur sin que la tripulación pudiera observar la pista ya que el techo se encontraba muy bajo, descendió al sur y regresó. Al ver la pista, el piloto viró a la derecha tratando de efectuar un circuito de 90°/270° para aterrizar por la cabecera 17 sin tener en cuenta que había un cerro de 318 ft por el lado donde estaba maniobrando, el cual en el momento del accidente se encontraba cubierto por neblina.

AC 47 T 1659 en el cerro de Tatama, entre Valle del Cauca y Risaralda (02/SEP/00). La aeronave había realizado varias operaciones en la zona y la visibilidad se encontraba reducida por condiciones meteorológicas adversas. El piloto decide volar por debajo de los mínimos y esto conlleva al impacto de la aeronave contra el terreno.

C-212 FAC 1251 en la Base Aérea de Tres Esquinas, Caquetá (04/DIC/00). La aeronave cruzó la estación con el fin de establecer básico izquierdo para la pista 24 con condiciones meteorológicas desfavorables. Durante el básico, el avión entró en IMC y la tripulación perdió la referencia visual, lo que ocasionó un descenso inadvertido, ocasionando CFIT a 2,5 NM de la unidad.

UH-60 FAC 4101 en área general de El Billar, Caquetá (14/jun/04). La aeronave tenía como misión realizar una evacuación aeromédica y 5 millas antes del punto disminuye su altura para evitar nubosidad estratiforme. Posteriormente pierde de vista el campo y al colocar potencia para ascender impacta con los árboles.

UH60L FAC 4132 en Apartadó, Antioquia (10/JUL/05). A las 23:48 UTC, después de realizar operaciones en la zona de Apartadó, proceden hacia la Brigada 17 encontrando la visibilidad reducida por nubosidad, motivo por el cual deciden proceder con rumbo



norte. Estando a 17 millas náuticas de Los Cedros, asumen condiciones instrumentos e interceptan la aerovía W-5 que los guiaría hasta el VOR de Los Cedros, estableciéndose con una altura de 8 000 ft. Al no ver la pista del aeródromo de Los Cedros, deciden iniciar el sobrepaso e intentar efectuar una aproximación con rumbo a una cancha de microfútbol la cual tenía encendida algunas luces. Durante la maniobra la aeronave golpea con el rotor principal uno de los postes de la cancha e impacta contra el terreno.

## 11.5 Caso de estudio

---

El 20 de julio de 2013 a las 23:35 HL (04:35 UTC), un escuadrón KFIR que se encontraba en operaciones, regresa a la Base Aérea de Apiay (Villavicencio) con intenciones de aterrizar, pero sin tener en cuenta que el aeródromo se encontraba cerrado por condiciones meteorológicas y no era posible realizar aproximación visual ni instrumentos. La situación se tornó crítica porque el escuadrón KFIR no tenía la suficiente reserva de combustible para dirigirse al aeródromo alternativo (Bogotá). Sin otra posibilidad, las tripulaciones asumen el riesgo y descienden por debajo de los mínimos meteorológicos con el ánimo de ver la pista y logran aterrizar con un techo de nubes inferior a los mínimos meteorológicos.

Según las condiciones atmosféricas reportadas en Apiay, para las 04:00 UTC, la visibilidad horizontal era de 4 000 m reducida por llovizna, techo de nubes a 1 500 ft con nubosidad dispersa y totalmente cubierto a 3 000 ft. Una hora después, las condiciones habían cambiado a 1 000 m de visibilidad horizontal, reducida por lluvia fuerte, nubosidad dispersa a 500 ft y totalmente cubierto a 1 000 ft.

La situación meteorológica de ese día y hora se representa en una imagen meteorológica en el canal infrarrojo, apoyada con la imagen del radar meteorológico del Tablazo durante la hora exacta del evento (figura 79).



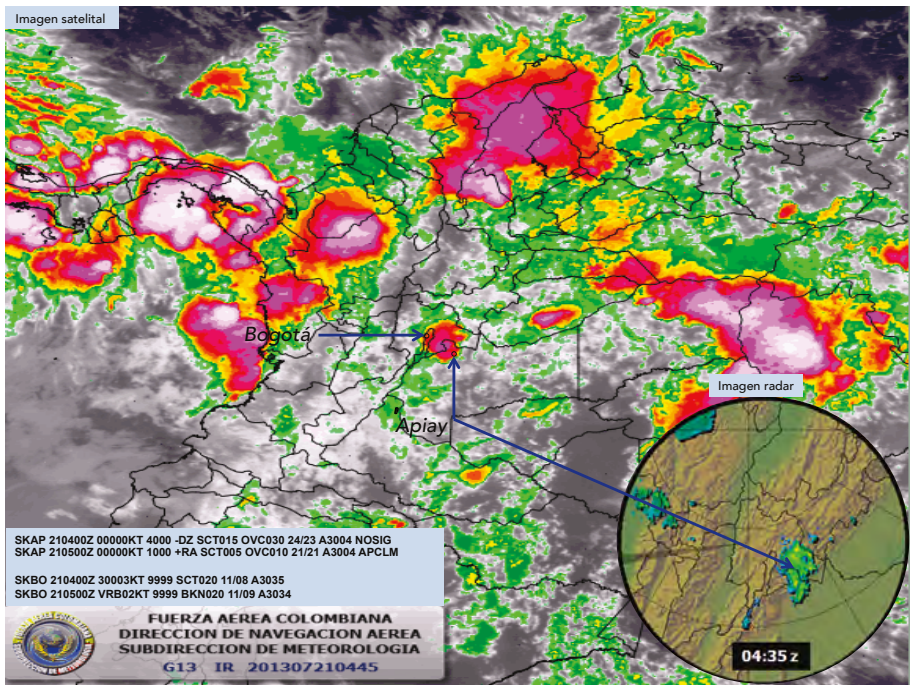


Figura 79. Imagen satelital y radar de un evento de baja visibilidad en Apiaj. Información meteorológica tomada del SIMFAC (s.f.)

Fuente: elaboración propia.





# Capítulo 12.

## Peligros meteorológicos – rayos y granizo

---

- 12.1 El rayo
- 12.2 Tipos de rayos
- 12.3 Fenómenos asociados al rayo
- 12.4 Efectos de los rayos sobre las aeronaves
- 12.5 Instrumentos de detección
- 12.6 Casos de impacto de rayo en la fac
- 12.5 Impacto con hielo

El impacto con rayos y granizo contribuye al 8 % de los accidentes aéreos a nivel internacional producidos por fenómenos meteorológicos (Moreno y Gil, 2003). En la Fuerza Aérea Colombiana los rayos han causado varios incidentes que van desde daños en las antenas y fuselaje, hasta el apagado de dos motores, como en el caso del A-37 FAC 2180 el 8 de agosto de 2008.

## 12.1 El rayo

---

Es el fenómeno meteorológico producto de las diferencias de potencial eléctrico entre dos puntos, en donde desde la carga negativa se transfieren millones de electrones al punto cargado positivamente. En otras palabras, el rayo es una descarga eléctrica entre dos puntos con carga eléctrica negativa y positiva.

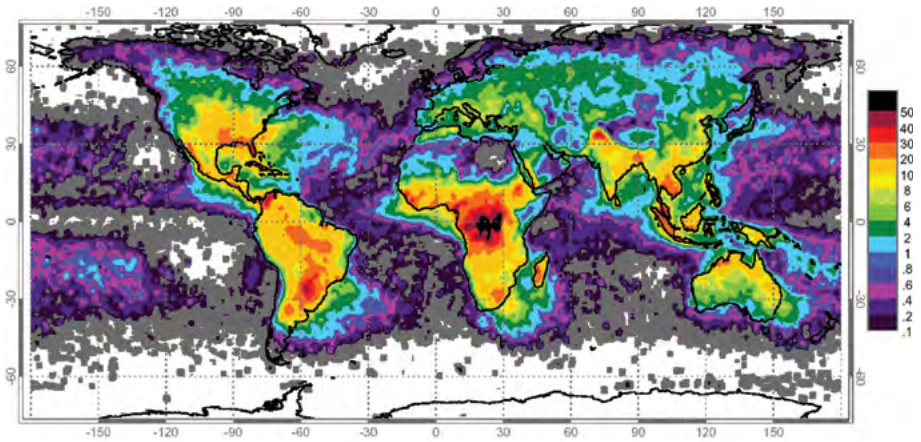
Wilson (1920) sugirió que existía una especie de balance entre la ionósfera, la superficie de la Tierra y las capas de aire que los divide, de tal manera que todo hacía parte de un circuito eléctrico global. Posteriormente, Whipple (1929) añadió que este balance estaba supeditado por las tres zonas del mundo con mayor convección profunda: Sur América Tropical, El Congo (región ecuatorial de África) y el sudeste de Asia y Australia, todos dentro de la zona tropical continental, lo que podría sugerir una relación entre la latitud, la longitud y la tendencia del fenómeno a evitar los océanos y los polos.

Estas tendencias podrían estar explicadas porque tanto en el ecuador como en el continente la temperatura es mayor, facilitando la formación de la convección y, por lo tanto, de las tormentas eléctricas. Este patrón también es aplicable al comportamiento diario del fenómeno, generándose con mayor frecuencia en los máximos de temperatura diaria.

En Colombia, Torres (s.f.) concluyó, por ejemplo, que en Medellín, Cali y Bogotá la hora máxima de actividad diaria se presentaba a las 15:30 hora local. Esta tendencia varía según el punto y época del año, guardando una relación directa con el comportamiento de la ZCIT y afectando principalmente la región Andina, Pacífica y Caribe.

Los detectores ópticos de rayos basados en satélites como el LIS (*Lightning Imaging Sensor*), del Global Hydrology Resource Center (GHRC), han permitido un estudio y seguimiento del comportamiento anual de los rayos desde 1995. Los datos provenientes de este instrumento han confirmado la mayor frecuencia de rayos en las tres zonas planteadas por Whiple (1929), siendo Colombia uno de los países con mayor número de descargas eléctricas. La figura 80 muestra el promedio anual de cantidad de rayos por  $km^2$  para todo el planeta.





**Figura 80.** Promedio anual de rayos medido por el sensor LIS, las áreas que no son visualizadas por el instrumento son representados en color blanco.

**Fuente:** Tomado de Earth Observatory (2017).

## 12.2 Tipos de rayos

**Nube al aire:** Son descargas eléctricas generadas desde una nube hacia la atmósfera, normalmente más arriba de la nube que la genera.

**Nube a Tierra:** Son los más comunes y peligrosos, usualmente se generan desde la nube hacia la tierra cuando esta última está cargada positivamente y desde la tierra hacia la nube cuando la tierra está cargada negativamente.

**Intranubes:** La descarga se produce dentro de la misma nube, la cual se encuentra con los dos tipos de iones; los positivos en la parte más alta de la tormenta y los negativos en la parte baja.

**Internubes:** El rayo es generado desde una nube cargada negativamente hacia otra nube con carga positiva.

## 12.3 Fenómenos asociados al rayo

**El relámpago.** Es el fenómeno luminoso que surge como consecuencia del rayo y que se desplaza a la velocidad de la luz (300 000 000 m/s), por lo tanto podrá ser perceptible por un observador casi de forma instantánea. El relámpago libera energía de forma repentina y momentánea, forzándola a manifestarse como un resplandor de luz.

**El trueno.** Es el fenómeno sonoro asociado al rayo, por lo cual será percibido a la velocidad del sonido (~340 m/s), seis órdenes de magnitud menos que la velocidad de la luz. La descarga eléctrica sobrecalienta súbitamente el aire que le rodea causando una violenta expansión que se propaga como onda sonora.

## 164 12.4 Efectos de los rayos sobre las aeronaves

---

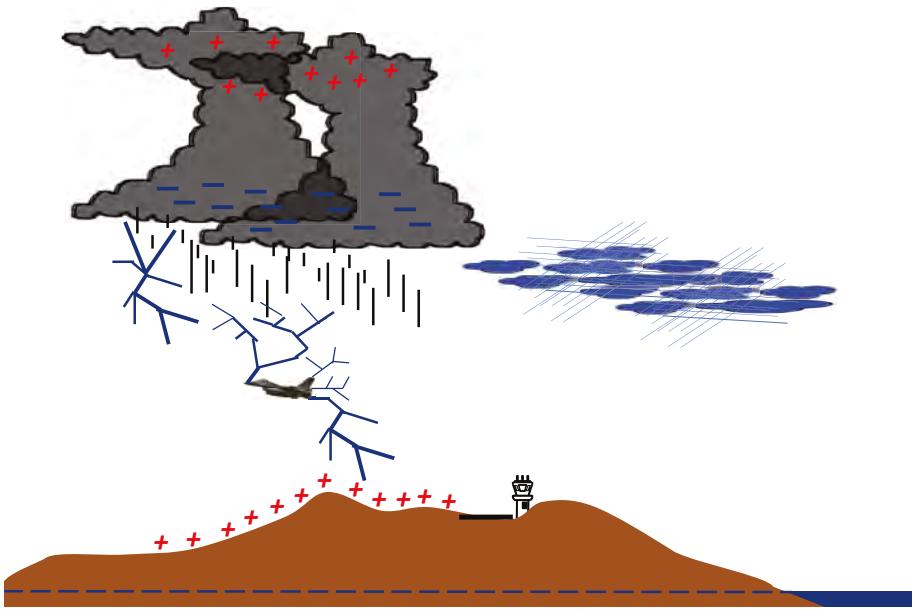
Se estima que, en promedio, de uno a dos rayos impactan una aeronave por año, pero que algunos tipos de aviones reciben más impactos que otros. En Colombia, que una aeronave sea impactada por un rayo no es una tarea difícil, hasta la tormenta más pequeña puede generar una descarga eléctrica con resultados negativos sobre la aeronave.

Hasta qué punto el rayo representa una amenaza para aeronaves en vuelo es un tema controversial. Aunque los ocupantes se encuentran protegidos por los requisitos de apantallamiento, que impide la penetración de las descargas eléctricas en el interior, las aeronaves pueden ser seriamente afectadas y los efectos podrían variar según los siguientes planteamientos:

- Interferencia con el funcionamiento de los equipos de radio.
- Perforación o astillado de estructuras no metálicas.
- Falla total de los equipos de comunicación por daño en las antenas.
- Averías en partes sin conexión a masa.
- Posibles daños en el circuito eléctrico de la aeronave.
- Deterioro de los compases magnéticos.
- Quema de alguna de las luces de la aeronave.
- Interferencia en los equipos de navegación.
- Estructuras metálicas deformadas como resultado de intensos campos magnéticos.
- Ignición de combustible por efecto de los miles de amperios inyectados a la aeronave.
- Daños en los sistemas de propulsión.

Para eliminar estos problemas, las aeronaves se construyen a imitación de una jaula de Faraday (perfectamente conductora), para lo cual los materiales no metálicos (fibra de vidrio, etc.) son sometidos a diferentes procesos que les permiten soportar y distribuir uniformemente, por toda la estructura de la aeronave, la enorme carga eléctrica que porta el rayo. Según la teoría, el rayo entra por la parte delantera de la aeronave, pasa por el fuselaje y sale por la parte trasera (figura 81).



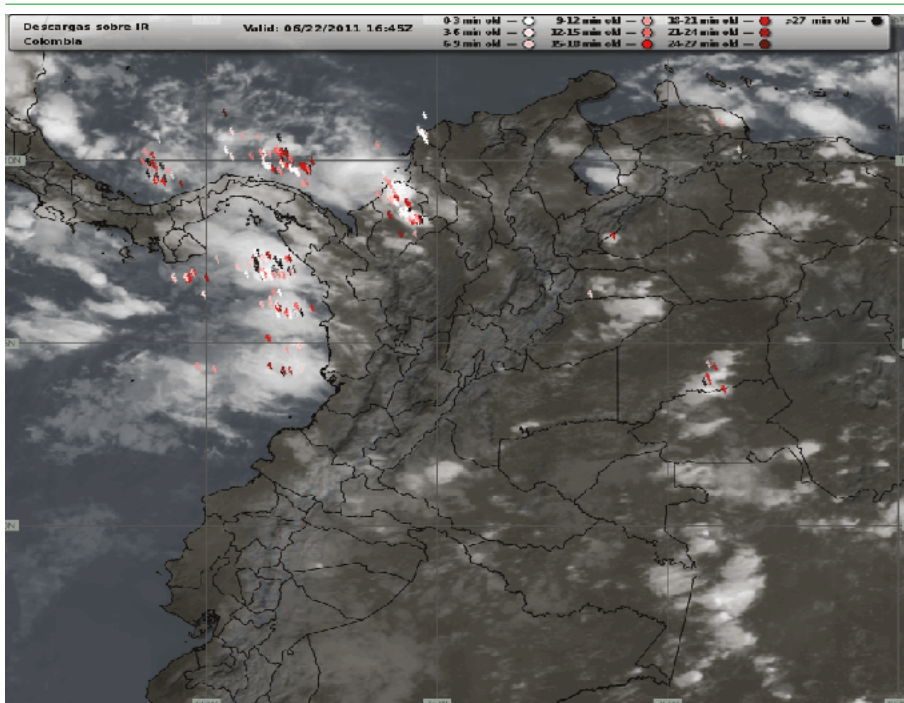


**Figura 81.** Impacto con rayo en aeronaves.  
**Fuente:** elaboración propia.

Esto es posible gracias a que el aluminio es bastante conductor y puede disipar las altas corrientes resultantes de un rayo. Sin embargo, la industria aeronáutica ha venido reemplazando el aluminio utilizado en la estructura del fuselaje, vigas de piso, estabilizadores y controles de vuelo, por la fibra de carbono, el cual es 1 000 veces más resistente que el aluminio al flujo de corriente (FAA, s.f). Aunque la fibra de carbono tiene la ventaja de ser un material mas resistente y menos pesado que el aluminio, sus desventajas incluyen una menor conductividad que el aluminio; por lo tanto, se necesita una malla o revestimiento de protección contra rayos (FAA, s.f).

## 12.5 Instrumentos de detección

En la actualidad, no se tienen sensores con capacidad para predecir rayos, solo para detectarlos una vez se presenten. La UAEAC, por ejemplo, pone a disposición de las tripulaciones información actualizada de las descargas eléctricas detectadas los últimos 30 minutos, esta información es contrastada contra la última imagen infrarroja disponible (figura 82).



**Figura 82.** Representación de la frecuencia de rayos sobre una imagen satelital en el canal infrarrojo.

Fuente: Tomado de UAEAC (s.f.).

## 12.6 Casos de impacto de rayo en la FAC

A-37 FAC 2177 a 56 MN del VOR de Barranquilla (10/NOV/04). Mientras la aeronave se encontraba en el punto DAGAN, muy cercano al punto de notificación ISOTO, fue impactada por un rayo causando el apagado del motor N°. 1.

A-37 FAC 2180 en el área general de Barranquilla (08/AGO/07). La aeronave recibe la descarga eléctrica a 25 000 ft apagándole los dos motores; el piloto reenciende los motores a 8500 ft y aterriza en CACOM-3. En la inspección en tierra se evidencia la salida de la descarga por el motor N°. 2.

El SR-560 FAC 5764 en Montería, Córdoba (20/OCT/09). La aeronave fue impactada por un rayo en el radomo<sup>31</sup>; dicho rayo se desplazó por la aleta de la cola y por varios remaches del fuselaje, dejando indicaciones de derretimiento en la lámina. La descarga salió por las tomas de descarga estática quemando tres de éstas, la antena VHF-2 y la luz de posición trasera.

<sup>31</sup> Parte de la estructura de la aeronave que se utiliza como antena de detección de condiciones meteorológicas adversas o antena de detección de blancos con cámaras infrarrojas.



A-29 FAC 3106, en el área de Puerto López, Meta (20/ABR/2012). El impacto se produce durante una misión de vuelo de prueba en la fase de ascenso para FL 250. Cuando la aeronave se encontraba a una altitud de 24 500 ft, el piloto siente un impacto fuerte y observa un destello de color azul en el área del *spinner*<sup>32</sup> de la hélice. La aeronave no presentó fallas del sistema eléctrico, de aviónica, ni de comunicaciones. El piloto canceló la misión y se aterrizó en la Base Aérea de Villavicencio sin novedad. Aunque las condiciones meteorológicas eran favorables para la realización del vuelo, durante la inspección posvuelo se encontró marca de impacto de rayo en la punta del plano derecho de la aeronave (figura 83), sin rastro de otro lugar de entrada o de salida. En consecuencia, es necesario realizar un cambio de motor a la aeronave.

167



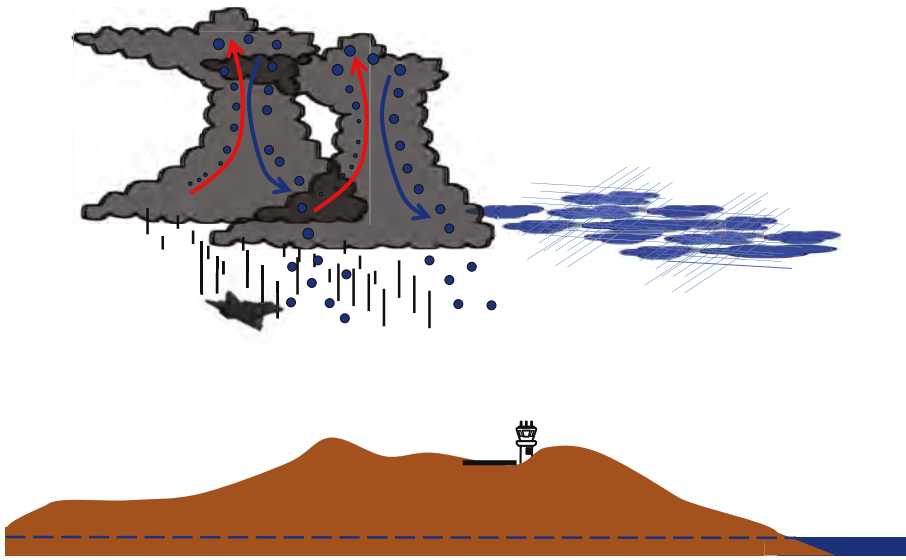
**Figura 83.** FAC 3106 impactado por rayo el 20/ABR/12.  
**Fuente:** Tomado de IGEFA (2012).

## 12.7 Impacto con hielo

El granizo proviene de nubes de desarrollo vertical tipo cumulonimbos, el cual cuenta con corrientes ascendentes y descendentes. A medida que un pequeño gránulo de hielo se mueve verticalmente, se le adhieren gotas sobre-enfriadas que se solidifican al impacto y van ganando más y más peso y se convierten en granizo después de múltiples ascensos y descensos. Cuando la fuerza de gravedad (peso) supera la fuerza de flotabilidad (corrientes ascendentes), el granizo se precipita (figura 84).

32 Parte final de un eje central que gira y del cual las hélices o palas están sujetas.





**Figura 84.** Impacto con hielo en aeronaves.

**Fuente:** elaboración propia.

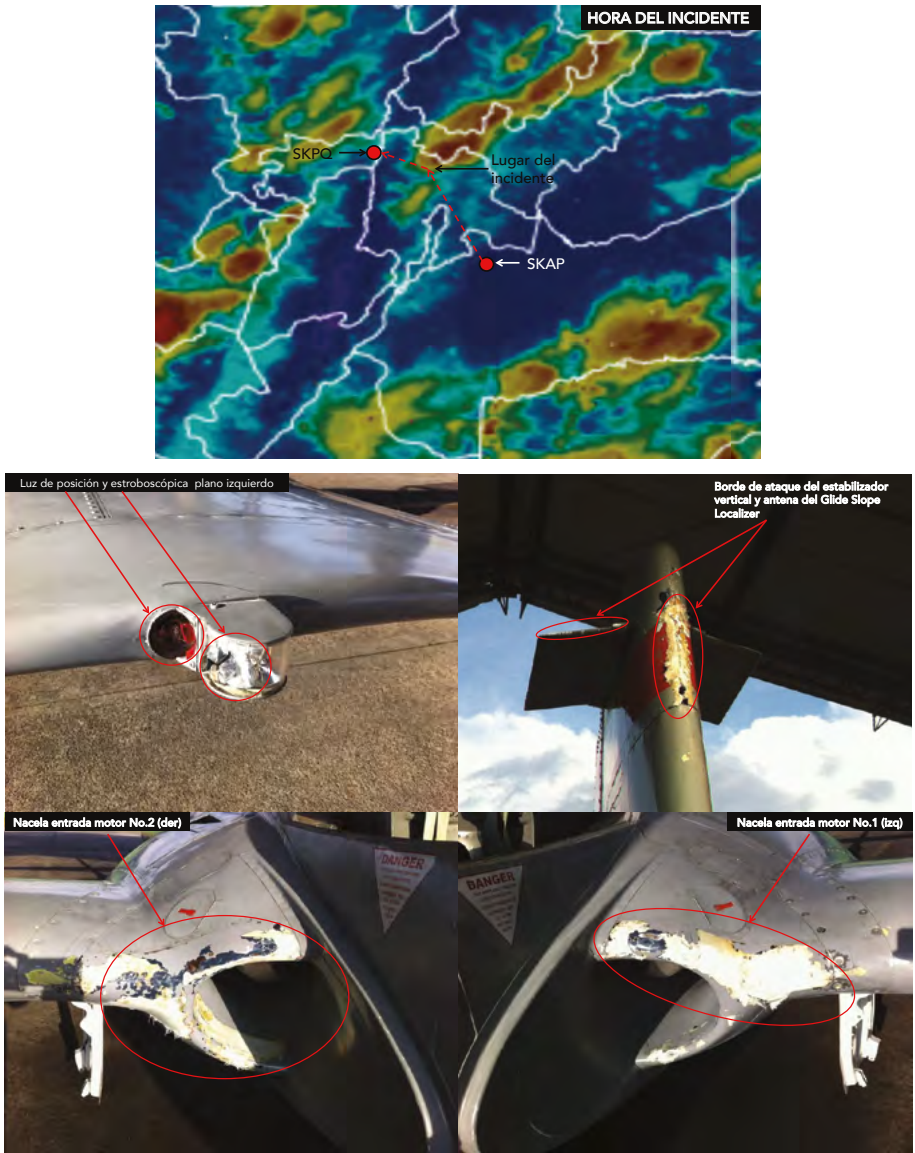
Contrario a lo que se podría pensar, no es necesaria una gran tormenta para generar granizo, por eso en Colombia este fenómeno no solamente depende del comportamiento de la ZCIT. Las tormentas de pequeña extensión también pueden generarlo, lo cual causa graves daños sobre la estructura y componentes de la aeronave. A manera de ejemplo se exponen los siguientes casos:

T-27 FAC 2256 en la ruta SKAP – SKAR (16/OCT/04). La aeronave fue golpeada por granizo mientras efectuaba la llegada normalizada Armenia-2 entre 11 000 y 15 000 ft. El Plexiglás de la luz de aterrizaje del plano derecha se rompió y el fuselaje sufrió abolladuras en el borde de ataque de los estabilizadores vertical y horizontal.

D-328 FAC 1160 en la ruta SKAS – SKCL (14/MAY/04). La aeronave se encontraba nivelada a 21 000 ft y después de cruzar una zona montañosa cercana a Popayán donde había formación de hielo, la tripulación encontró el cielo despejado y condiciones visuales. Sin embargo, un pedazo de hielo golpeó el vidrio frontal derecho fisurando toda la superficie frontal del mismo, obligando a la tripulación a realizar una reducción de velocidad y altura por temor a una despresurización de la aeronave. A pesar de los daños, el avión logró aterrizar en el aeropuerto de Cali.

T-37B FAC 2127 en la ruta SKAP – SKPQ (26/SEP/12). La aeronave sufrió graves daños en la estructura del avión al sobrevolar una zona de tormenta a las 16:15 hora local. El granizo causó daños en la luz de taxeo, luz de indicación del tren de aterrizaje, luz de posición y estroboscópica del plano izquierdo, nariz del avión, nacela de entrada al motor derecho e izquierdo, borde de ataque del estabilizador vertical y antena del Glide Slope Localizer (figura 85b). Las condiciones meteorológicas del punto y la ruta pueden ser visualizadas en la imagen infrarroja en la cual también se ha trazado la ruta de vuelo de la aeronave (figura 85a).





**Figura 85.** Imagen infrarroja con la ruta de la aeronave y daños causados por impacto con hielo.  
**Fuente:** Tomado de IGEFA (2012).



# Capítulo 13.

## Meteorología satelital

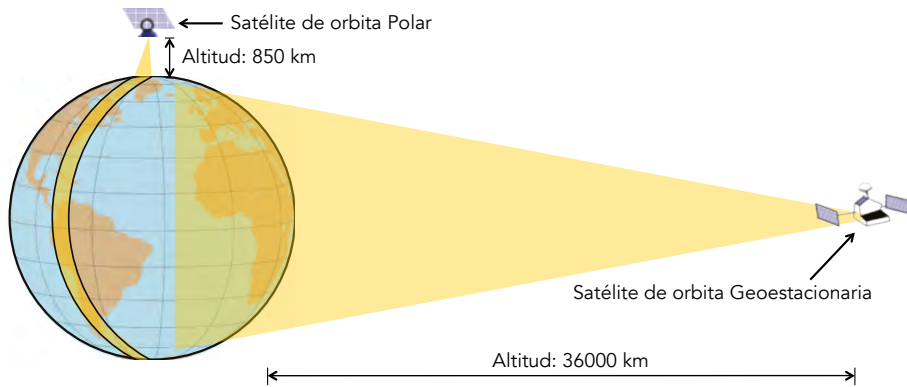
---

- 13.1 Satélites meteorológicos
- 13.2 Identificación del canal
- 13.3 Identificación de la nube según el canal
- 13.4 Nefoanálisis

La meteorología satelital es útil para visualizar el conjunto Tierra–Atmósfera y extraer la máxima información a través de una de las distintas técnicas de teledetección, la medida de radiancias remotamente. Esta información es analizada con el fin de conocer y entender el estado actual de la atmósfera. Las imágenes meteorológicas satelitales se utilizan principalmente para la detección y clasificación de nubes, observación del vapor de agua existente en la atmósfera, y temperatura de la superficie marítima y terrestre.

## 13.1 Satélites meteorológicos

Un satélite meteorológico es una plataforma de teledetección espacial que lleva a bordo espectroradiómetros, instrumentos ultrasensibles que captan radiaciones reflejadas (visual) y emitidas (infrarrojo) del espectro electromagnético en diferentes bandas, captando así datos e imágenes de la atmósfera y de la superficie terrestre para luego enviarlos a estaciones receptoras en Tierra. Los satélites se clasifican según su órbita en dos grandes grupos: satélites geoestacionarios y satélites polares (figura 86).



**Figura 86.** Órbita de los satélites meteorológicos.

**Fuente:** elaboración propia.

Los satélites de *órbita polar*, como su nombre lo indica, orbitan la Tierra aproximadamente de polo a polo; también son llamados *satélites heliosincrónicos*<sup>33</sup>. Este grupo de satélites está compuesto principalmente por los satélites POES de la agencia NOAA

<sup>33</sup> Satélites que están en una órbita que le permite pasar sobre cualquier punto de la superficie terrestre a la misma hora solar local.



(National Oceanic and Atmospheric Administration), de origen norteamericano, y los METOP, FY y METEOR, de origen europeo, chino y ruso respectivamente.

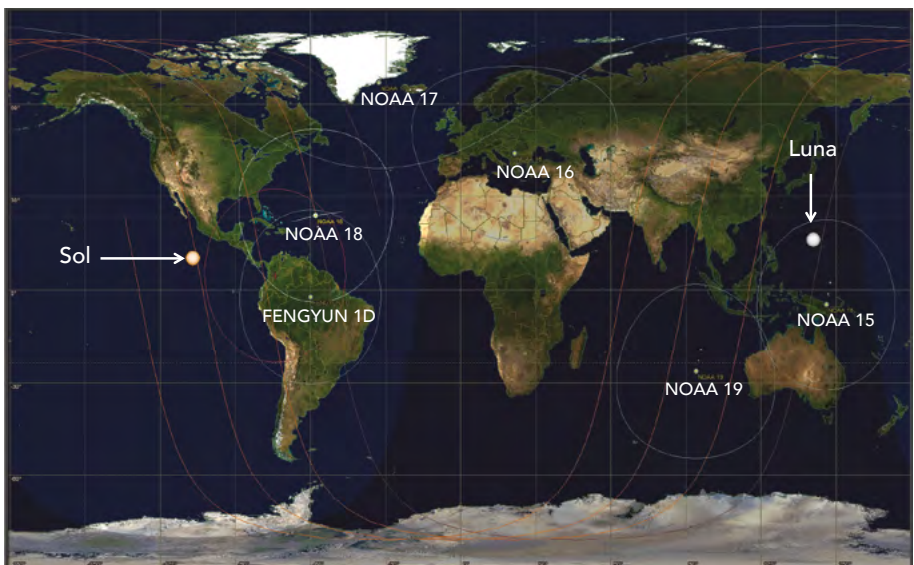
La constelación de satélites POES de la NOAA está compuesta por: NOAA-15, NOAA-18 y NOAA-19. Se prevé que la nueva generación de satélites, es decir, NOAA-20, haga parte de una nueva constelación llamada Joint Polar Satellite System (JPSS), la cual ya cuenta con su primer satélite, el Suomi NPP.

Los satélites geoestacionarios o geosincrónicos<sup>34</sup> orbitan a una altura mucho más superior que los polares y se encuentran sobre la línea del ecuador. Están conformados principalmente por la serie GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) de la NOAA que cubren las Américas y parte del Océano Atlántico y Pacífico. El resto del planeta está cubierto por diferentes agencias/satélites tales como METEOSAT (Unión Europea), INSAT (India), ELEKTRO (Rusia), HIMAWARI (Japón), principalmente.

173

### 13.1.1 Satélites polares o helio – sincrónicos

Estos satélites se mueven alrededor de la Tierra en una órbita elíptica, sincronizada con respecto al Sol en un movimiento circular que se desplaza de *Polo a Polo* (figura 87). Los actuales satélites están ubicados en órbitas que van desde los 800 hasta los 1000 km. Este tipo de satélite tiene la función de observar toda la Tierra dos veces al día y proporcionar imágenes con resoluciones cercanas a 1 km, tanto en el espectro visible como en el infrarrojo. Satélites con mayor resolución, como el Suomi NPP, cuentan con el VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) y por lo tanto alcanzan una resolución de 750 m.



**Figura 87.** Órbita de los satélites polares.  
**Fuente:** elaboración propia.

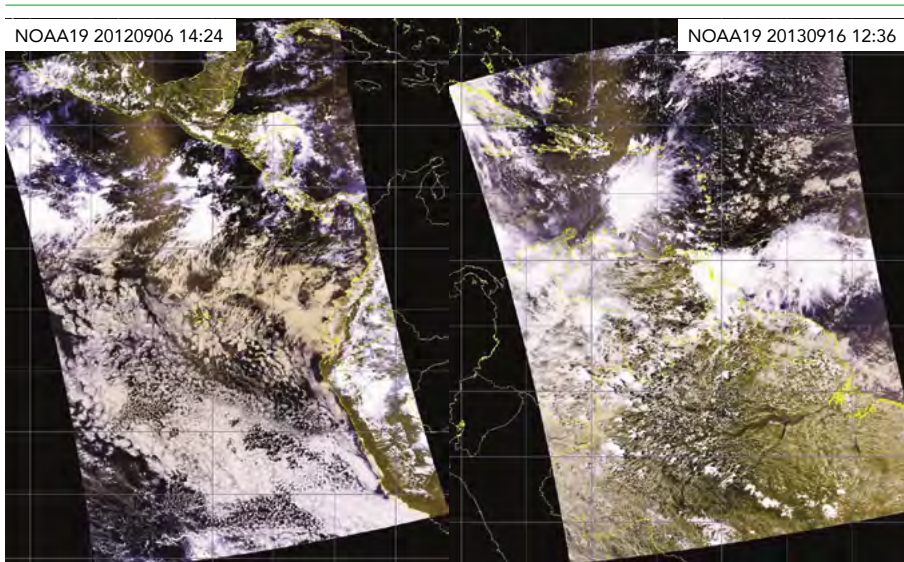
34 Están sincronizados con el movimiento de rotación de la Tierra.

El ancho de la franja de visión normalmente es de 2 600 km y el satélite envía los datos a las estaciones donde la información es procesada y analizada. El tiempo de transmisión y análisis de datos hace que la información no esté disponible para el usuario en *tiempo real*<sup>35</sup>.

174

Los datos de estos satélites están limitados en el sentido que solo pasan por una misma zona dos veces al día, de tal manera que si la primera pasada se realiza a las 04:00 horas, el segundo paso se calcula para las 16:00 horas. No siempre el satélite cubre toda el área de interés ni pasa todos los días a la misma hora sobre una misma área.

La figura 88, por ejemplo, muestra la franja de imagen tomada desde el satélite polar NOAA19 el 06/SEP/12 a las 14:24 HL y el 16/SEP/13 a las 12:36 HL con resolución de 1 km. Estos casos representan la desventaja del satélite polar al no tomar datos de algunas de las zonas orientales y occidentales de Colombia.



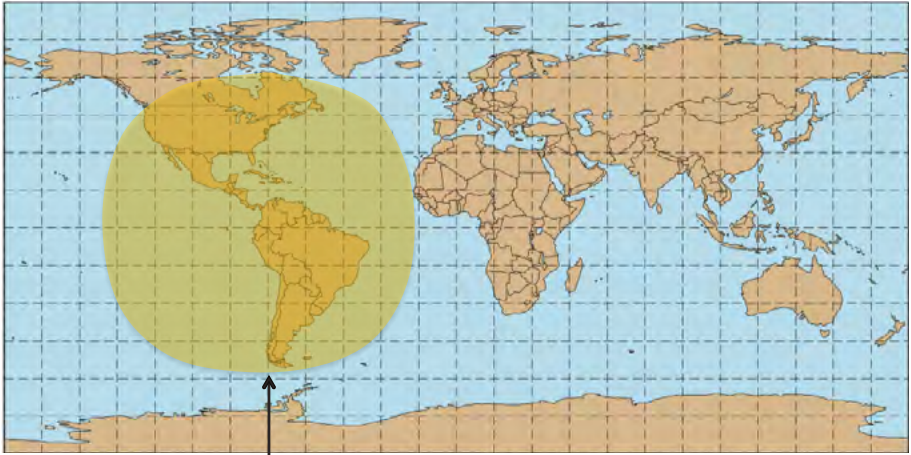
**Figura 88.** Problemas que se presentan en área de barrido de los satélites polares.  
**Fuente:** Tomado del SIMFAC (s.f.).

### 13.1.2 Satélites geoestacionarios

La altitud de la órbita de un satélite geoestacionario es de 36 000 km. A esta altitud el periodo orbital es de 24 horas y coincide con la velocidad de rotación de la Tierra, de tal manera que el satélite parecerá estar siempre fijo sobre el mismo punto de la Tierra con una única área de cubrimiento. Por la ubicación de Colombia, las imágenes meteorológicas satelitales proceden del GOES 13 (figura 89).

<sup>35</sup> La American Meteorological Society (s.f.c) define *tiempo real* como datos u observaciones para los cuales el reporte o registro de eventos es casi simultáneo a su ocurrencia.





Área de cobertura GOES-13

**Figura 89.** Área de cubrimiento del GOES-13.

**Fuente:** elaboración propia.

**Ventajas:**

- Solo se necesitan 5 satélites para cubrir toda la Tierra (excepto los polos)
- Visibilidad permanente sobre la zona de interés
- Datos de observaciones cada media hora para el caso de Colombia

Se espera que la nueva generación GOES-R, que ya está en órbita, entre en servicio operacional a partir del 2018; como GOES-East, esta provee tres veces más información espectral, tiene cuatro veces más resolución espacial y generará datos de observaciones cada 15 minutos sobre Colombia.

**Limitaciones:**

- No toma datos sobre regiones polares.
- En el canal infrarrojo y vapor de agua, la resolución es de 4 km.

Se espera que el GOES-16 provea imágenes visibles con 500 m de resolución e imágenes infrarrojas a 1 km. El satélite cuenta con 16 bandas espectrales (2 canales visibles, 4 en infrarrojo cercano y 10 infrarrojos) en lugar de las 5 bandas actuales.

### 13.1.3 Características de los canales del GOES

Las características actuales del sensor, resolución temporal, tipo de canal, resolución espectral y resolución espacial son resumidas en la tabla 19.





**Tabla 19.** Características actuales de los canales del satélite GOES.

Sensor	Resolución temporal	Canal	Resolución espectral (micrómetros)		Resolución espacial (km)
Imager	30 min.	1	Visible	0,52 – 0,72	4
		2	Infrarrojo cercano	3,78 – 4,03	
		3	Vapor de agua	6,47 – 7,02	
		4	Infrarrojo lejano	10,2 – 11,2	
		5	Infrarrojo profundo	11,5 – 12,5	
Sounder	30 min.	1	Visible		8

Fuente: elaboración propia.

Las características del futuro GOES-R son resumidas en la tabla 20 según la NOAA (s.f.).

**Tabla 20.** Características del GOES-R.

Sensor	Resolución temporal	Canal	Resolución espectral (micrómetros)		Resolución espacial (km)
Imager	15 min.	1	Visible	0,45 – 0,49	1
		2	Visible	0,59 – 0,69	0,5
		3	Infrarrojo	0,84 – 0,88	1
		4	Infrarrojo	1,37 – 1,38	2
		5	Infrarrojo	1,58 – 1,64	1
		6	Infrarrojo	2,22 – 2,27	2
		7	Infrarrojo	3,80 – 4,00	2
		8	Vapor de agua	5,77 – 6,60	2
		9	Vapor de agua	6,75 – 7,15	2
Sounder		10	Infrarrojo	7,24 – 7,44	2
Imager		11	Infrarrojo	8,30 – 8,70	2
Sounder		12	Infrarrojo	9,42 – 9,80	2
Imager		13	Infrarrojo	10, – 10,60	2
Sounder		14	Infrarrojo	10,80 – 11,60	2
		15	Infrarrojo	11,80 – 12,80	2
		16	Infrarrojo	13,00 – 13,60	2

Fuente: Modificado de NOAA (s.f.).

Es importante conocer la resolución de una imagen porque es la única manera de interpretar la información suministrada por la misma. A continuación se hace una breve explicación de los términos más comunes asociados a resolución.

**Resolución espacial.** Indica el tamaño del pixel, está relacionada con el objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen.

**Resolución espectral.** Indica el número y anchura de las regiones del espectro electromagnético para las cuales capta datos el sensor.

**Resolución temporal.** Tiempo que transcurre entre dos imágenes consecutivas.



**Resolución radiométrica.** Indica la capacidad del sensor de discriminar entre pequeñas variaciones en la radiación que capta. Se expresa en el número de bits requeridos para almacenar cada celda, un satélite de 8 bits representa  $2^8$  o 256 niveles de energía que pueden ser captados. Cuanto mayor sea la precisión radiométrica mayor número de detalles podrán captarse en la imagen.

En el programa GOES, los canales 1, 2, 4 y 5 son útiles para observar la forma de las nubes y determinar su temperatura, así como para inferir su base y altura, incluso en horas de la noche. El canal 3 suministra información del contenido de vapor de agua en niveles medios y altos de la atmósfera y es utilizado en contraste con los canales infrarrojos para definir tipo y altura de nubes. Para que los satélites puedan tomar datos, se hace necesario utilizar la técnica de teledetección.

## 13.2 Identificación del canal

Según el canal (resolución espectral) de donde provenga la imagen satelital, se podrá detectar cierto tipo de fenómeno meteorológico. Para el caso de las nubes, el analista de imágenes debe adiestrar su percepción para entender la información que está recibiendo y reconocer el canal que se está utilizando por imagen.

En el caso de la FAC, los canales utilizados son infrarrojo ( $10,7 \mu\text{m}$ ), visual ( $0,65 \mu\text{m}$ ) y vapor de agua ( $6,75 \mu\text{m}$ ). Para una buena identificación de nubes, se debe hacer antes una buena identificación de canal teniendo en cuenta que:

- Originalmente, los canales infrarrojos (IR), vapor de agua (WV) y visual (VIS) contienen datos satelitales de radiancia (los dos primeros) y de reflectividad en color blanco y negro; la escala de colores asignada es simplemente un realce a ciertos intervalos de radiancia/reflectividad, lo que permite una mejor visualización para su análisis. Para cada valor o intervalo de radiancia medido por el satélite se ha calculado su equivalencia en términos de temperatura.
- No hay colores asociados a un buen o mal tiempo, dependen única y exclusivamente de los administradores del banco de imágenes que reciben los datos en una estación en tierra, quienes les asignan diferentes paletas de colores, dependiendo del fenómeno que se quiera resaltar.
- A cada canal VIS, WV e IR, se le asigna un cierto rango de longitudes de onda, lo que les permite detectar fenómenos meteorológicos diferentes.

### 13.2.1 Reconociendo una imagen en el canal visual

La imagen del canal visible muestra las nubes tal cual como las vería el ojo humano desde el espacio, y aunque no es posible determinar objetivamente la altura de las nubes, pueden detectarse algunas de sus características. Dependiendo del ángulo de incidencia de la luz solar, algunas nubes de desarrollo vertical, como es el caso de los cumulonimbos, presentan sombras que pueden ayudar a inferir la altura de las nubes circundantes.

En este tipo de imágenes, los centros de los cumulonimbos se parecen mucho a una alcantarilla abierta donde rebosa el agua en forma de burbujas y normalmente se observarán protuberancias donde el fenómeno es más fuerte.



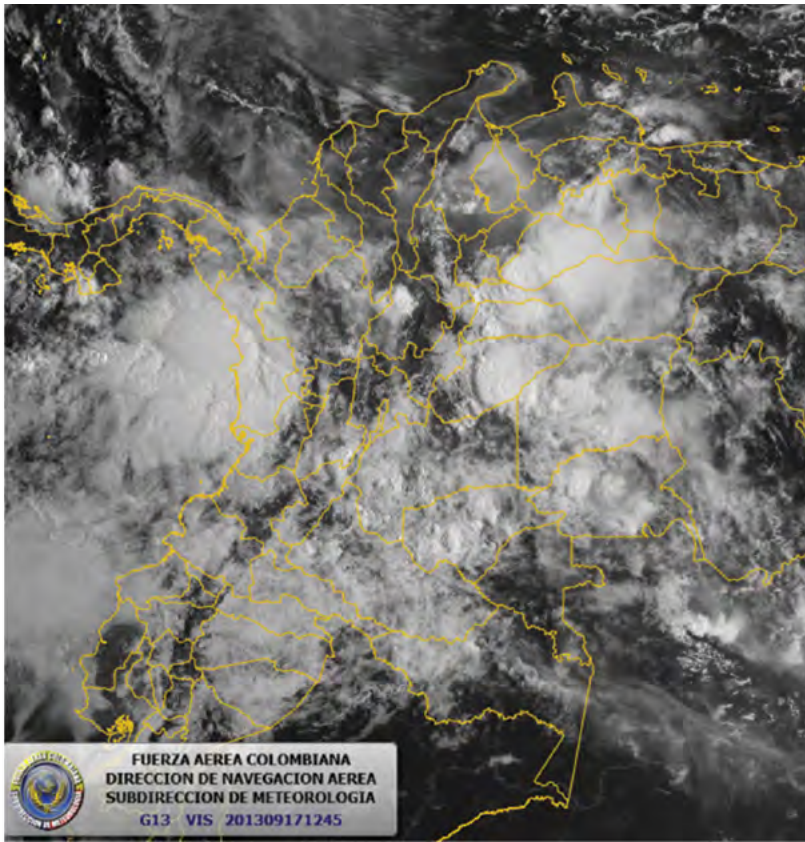


Figura 90. Imagen visual GOES-13.

Fuente: Tomado de SIMFAC (s.f.).

Generalmente, en horas de la tarde, se observa una cadena de estratocúmulos en las cordilleras, asociadas al viento proveniente del Este, que chocan con las montañas colombianas. Este aire asciende, se enfría, se condensa y produce nubosidad convectiva.

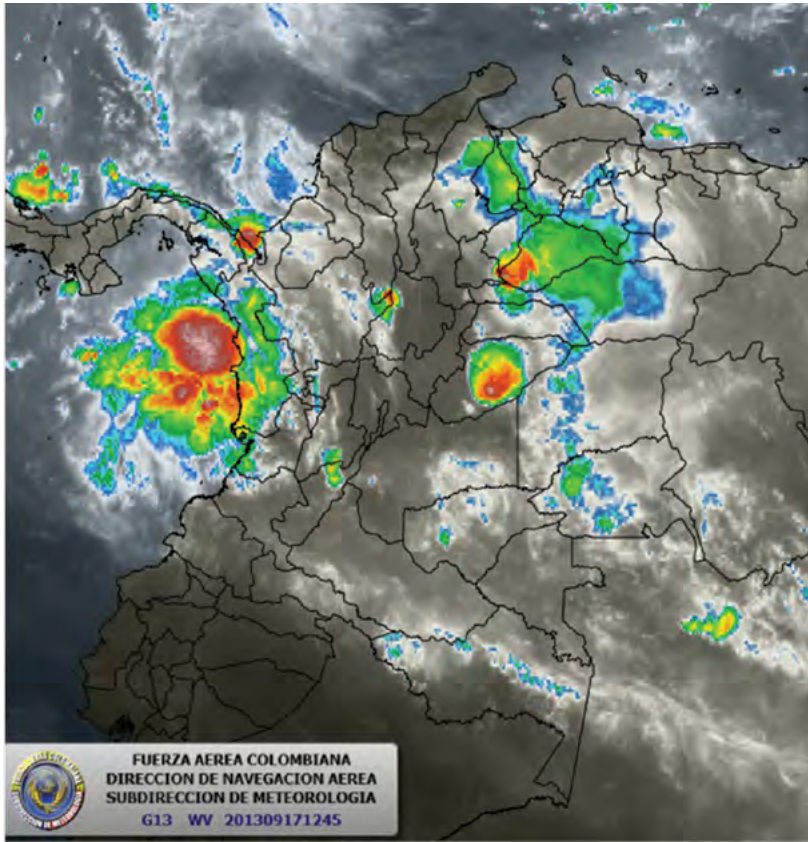
### 13.2.2 Reconociendo una imagen en el canal vapor de agua

Parece una foto mal tomada o corrida, aparenta un velo transparente que necesita ajustes y se puede pensar que necesita mejoras en la resolución. Los bordes de los sistemas más desarrollados (cumulonimbos) no están bien definidos y parecen estar pixelados, esto como respuesta del cálculo de la cantidad de agua presente en la atmósfera.

Este tipo de imagen normalmente contiene menos información, ya que solo está en capacidad de detectar nubes medias (alto estratos y alto cúmulos) y de desarrollo vertical. Las áreas que muestra este tipo de imagen son casi siempre donde las condiciones atmosféricas están más deterioradas.

Las imágenes de vapor de agua son útiles para efectuar seguimiento a patrones atmosféricos que de otra forma no se verían; esto, debido a la facilidad con que el vapor de agua es transportado por la circulación atmosférica.





**Figura 91.** Imagen vapor de agua GOES-13.

**Fuente:** Tomado de SIMFAC (s.f.).

### 13.2.3 Reconociendo una imagen en el canal infrarrojo

Para el ojo humano, esta imagen presenta mayor resolución que una imagen en vapor de agua, pues los bordes de los sistemas más complejos (cumulonimbos) están bien definidos.

Esta imagen provee mayor información y permite ver todos los tipos de nubes (bajas, medias, altas y de desarrollo vertical), ya que cada valor de radiancia tiene asociada una temperatura. Así, haciendo uso del gradiente vertical de la temperatura del aire, es posible determinar la altura de cada nube.

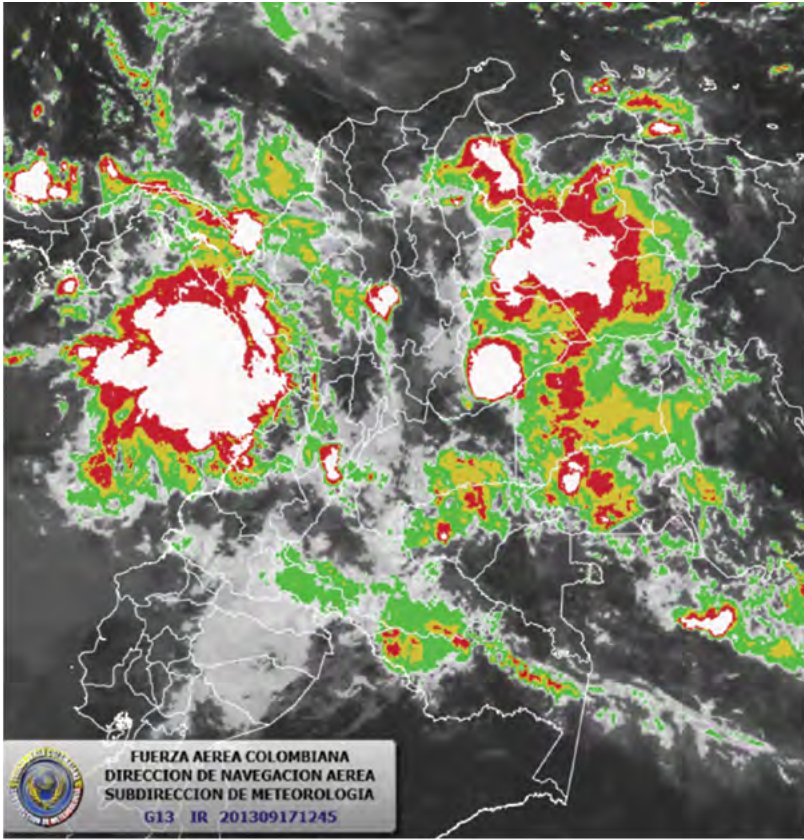


Figura 92. Imagen infrarroja GOES-13.

Fuente: Tomado de SIMFAC (s.f.).



# 13.3 Identificación de la nube según el canal

Cada canal está o no en la capacidad de detectar cierto tipo de fenómenos meteorológicos. El brillo de una nube (más blanco) debe interpretarse según el canal (tabla 21).

**Tabla 21.** Significado del brillo en una nube según el canal.

BRILLO (blanco más intenso)		
CANAL VIS	CANAL IR	CANAL WV
<p>Espesor (a más espesor más brillo). Más cantidad de agua en las nubes, más brillante. Puede detectar ondas de montaña.</p>	<p>Las zonas más frías aparecerán más blancas y brillantes. El brillo depende de la latitud del tope nuboso.</p>	<p>Las zonas más brillantes tendrán gran contenido de humedad, las zonas oscuras representan poca humedad. Pueden detectar turbulencia en aire claro.</p>

**Fuente:** elaboración propia.

De la misma manera, cada canal, según la longitud de onda en la que opere, tiene o no más capacidad de detectar las nubes según su altura, las cuales indican la presencia de humedad en la atmósfera. Un enfoque práctico que sirva como base para clasificar las nubes utilizando imágenes de satélite puede resumirse en la tabla 22.

**Tabla 22.** Detección de nubes según el canal.

	CANAL VIS	CANAL IR	CANAL WV
<b>Nubes altas</b>	Las detecta con dificultad.	Sí las detecta. La observación de los cirros permite rastrear los vientos.	Las detecta con dificultad.
<b>Nubes medias</b>	Las detecta con dificultad.	Fácilmente detectables.	Fácilmente detectables.
<b>Nubes bajas</b>	Fácilmente detectables. Pueden verse las nubes de montaña. Los Cb presentan protuberancias en el centro. Los estratos son extensos en sentido horizontal.	Sí las detecta.	No las detecta, una leve señal podría tratarse de un estratocúmulos.
<b>Niebla</b>	Fácilmente detectables. Suele ser estacionaria. Confinada por montañas. Textura uniforme y extensa.	La detecta con dificultad. Textura uniforme.	No la detecta.
<b>TCU y Cb</b>	Fácilmente detectables. Son altamente reflexivos. Las cimas ayudan a localizar zonas con corrientes ascendentes. Se observan gránulos bien formados en el centro de los Cb.	Fácilmente detectables. Las bajas temperaturas indican áreas con fuerte desarrollo vertical. Las cimas más grandes con fuerte desarrollo vertical se distinguen claramente.	Fácilmente detectables. La aparición de nubes en este canal revela las nuevas tormentas.

**Fuente:** elaboración propia.



# 13.4 Nefoanálisis

Una vez se conocen las características y capacidades del canal de donde proviene la imagen, se procede a comparar los tres canales, de tal manera que sea factible identificar el tipo y altura de la nube. Para hacer un correcto nefoanálisis, se debe conocer la información presentada en la tabla 23.

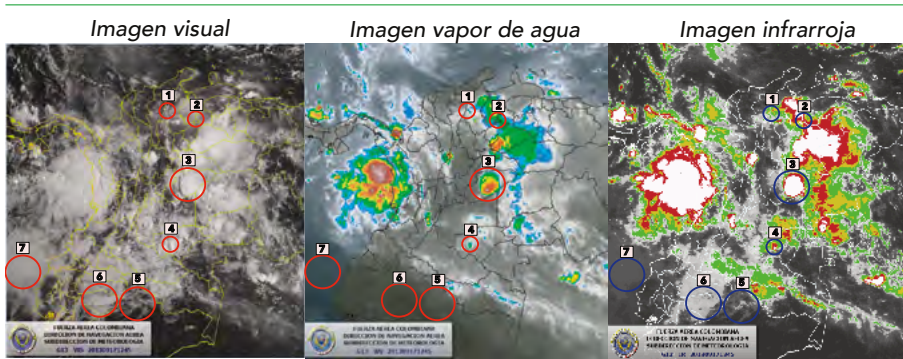
182

**Tabla 23.** Capacidades del canal en la detección de tipo de nubes.

CANAL VIS		Canal de identificación	
		Principal	Secundario
Altas > 6 km	Cirros (Ci)	IR	
	Cirro estratos (Cs)		
	Cirro cúmulos (Cc)		
Medias 2 km – 6 km	Alto estratos (As)	WV	IR, detecta especialmente Ac
	Alto cúmulos (Ac)		
Bajas 0 – 2 km	Estratos (St)	VIS	IR, detecta especialmente Sc
	Estrato cúmulos (Sc)		
Desarrollo vertical 0 – 20 km	Cúmulos (Cu)	Difíciles de identificar	
	Torrecúmulos (TCU)	IR – WV – VIS	
	Cumulonimbos (Cb)		

Fuente: elaboración propia.

Tomando tres imágenes en diferente canal y asignando siete casos de ejemplo, se puede determinar el tipo y altura de las nubes previamente identificadas en la figura 93.



**Figura 93.** Nefoanálisis sobre el territorio colombiano.

Fuente: elaboración propia.

Una vez analizadas y comparadas las imágenes en los tres canales, se asigna un «SI» indicando que el canal tiene la capacidad de ver la nube objeto de estudio y un «---» indicando que no la puede detectar. El análisis de detección en los tres canales permite definir el tipo y altura de la nube (tabla 24).



Tabla 24. Tipo y altura de nubes según nefoanálisis.

Nubes Ejemplo	Canal de identificación			Tipo de nube	Altura
	IR	WV	VIS		
Nube 1	SI	SI	SI	"Ac" detectados en IR y WV "St" detectados en VIS	2 – 6 km 0 – 2 km
Nube 2	SI	SI	----	"Ac" detectados en IR y WV	2 – 6 km
Nube 3	SI	SI	SI	"Cb" señal en todos los canales	0 – 20 km
Nube 4	SI	SI	SI	"TCU" señal en todos los canales	0 – 12 km
Nube 5	SI	----	SI	"Sc" señal fuerte en IR y VIS "Ac" señal fuerte en IR	0 – 2 km 2 – 6 km
Nube 6	SI	----	SI	"Sc" señal fuerte en IR y VIS	0 – 2 km
Nube 7	SI	SI	SI	"St" señal fuerte en IR y VIS	0 – 2 km

Fuente: elaboración propia.







# Capítulo 14.

## Mapas meteorológicos

14.1 Mapa de superficie o sinóptico

14.2 Mapa de tiempo significativo

14.3 Fenómenos especiales – huracanes

La temperatura, la humedad, la presión, el viento y otras variables meteorológicas que modifican el estado del tiempo están distribuidas vertical y horizontalmente por todo el globo; sus mediciones se hacen desde estaciones distribuidas de forma irregular y los datos son interpolados para producir mapas espaciales de fácil lectura e interpretación por parte de las tripulaciones y centros meteorológicos internacionales. Mucha de la información es representada mediante mapas de contornos, los cuales utilizan líneas imaginarias que unen puntos de igual valor y difieren en el nombre según la variable que se está graficando, las más utilizadas son resumidas en la tabla 25.

**Tabla 25.** Isolíneas más comunes.

Isolíneas	Variable a graficar
Isotermas	Puntos con igual temperatura
Isobaras	Puntos con igual presión
Isotacas	Puntos con igual magnitud de viento
Isohipsas	Puntos con igual altitud
Isocero	Puntos con temperatura de 0° Celsius.

**Fuente:** elaboración propia.

Los mapas meteorológicos pueden encontrarse en superficie o en cualquier altitud, generalmente se utilizan altitudes estándar representadas en niveles de presión como 850, 700, 500, 300, 200 y 100 mb para brindar información de interés. Si se desconoce la altura en metros a los que hace referencia cierto nivel de presión, puede utilizarse el siguiente procedimiento rudimentario, pero efectivo por debajo de 500 mb:

- 1 Se resta a 1000 el nivel isobárico en mb que se desea conocer.
- 2 Al resultado se le agrega un cero imaginario para obtener la altitud en metros.
- 3 Se multiplican los metros por 3,3 para conocer el resultado en ft.

Ejemplo: *Usted desea conocer la altitud en pies de la isóbara 870 mb.*

- 1  $1\ 000 - 870 = 130$
- 2 *a 130 se le agrega un cero (0) imaginario = 1 300 metros*
- 3  $1\ 300 \times 3,3 = 3\ 900\ ft$



# 14.1 Mapa de superficie o sinóptico

Representa la presión atmosférica a nivel medio del mar, para lo cual los datos con elevaciones diferentes son corregidos y simulados como si estuvieran en el nivel medio del mar. En latitudes medias, el incremento o descenso de la presión atmosférica representa muy bien la tendencia del estado del tiempo y este comportamiento puede identificarse por medio de las isobaras.

Cuando se toma la presión en un mismo instante de tiempo sobre diferentes puntos de la Tierra, se puede graficar el resultado en un mapa, de tal manera que los diferentes patrones atmosféricos que rigen las condiciones atmosféricas de una determinada región pueden ser identificados. Las principales formaciones isobáricas simbolizadas en un mapa sinóptico son: Baja presión, Alta Presión, vaguada, dorsal y frentes atmosféricos.

## 14.1.1 Baja presión

Como se explicaba en capítulos anteriores, en la práctica se equipara al término *ciclón*, donde la dirección de rotación del viento se realiza contra las manecillas del reloj en el hemisferio Norte y en forma inversa en el hemisferio Sur. Es una zona donde las isobaras tienden a formar patrones circulares y la presión más baja se concentra en el centro del patrón, puede extenderse desde unos cuantos cientos de metros de diámetro hasta unos 2 000 km en latitudes tropicales. En los mapas de superficie, el centro del ciclón se demarca con un B (Baja) o L (Low) en inglés. En este caso el aire será más inestable con mayor probabilidad de movimientos ascendentes y, por lo tanto, se asocia a mal tiempo (figura 94).

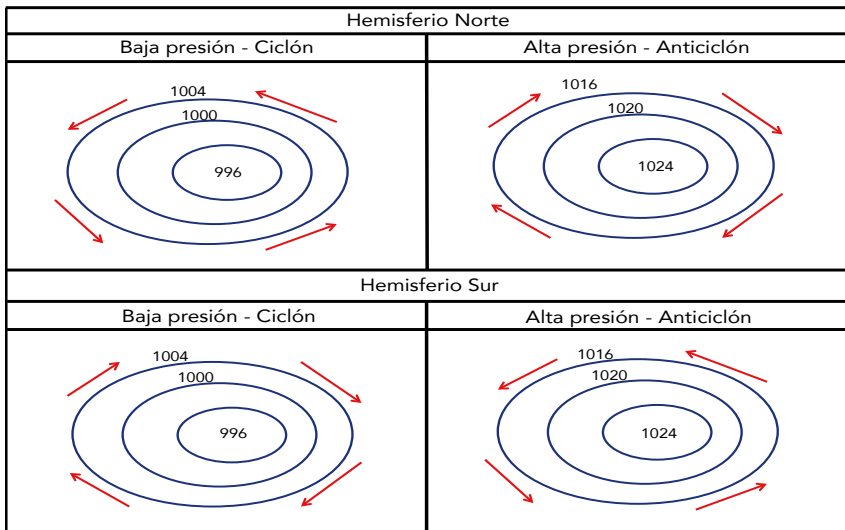


Figura 94. Rotación de los sistemas barométricos.

Fuente: elaboración propia.



### 14.1.2 Alta presión

En esta zona las isobaras tienden a formar patrones circulares y la presión más alta se concentra en el centro del patrón, se representa con una A (Alta) o H (High) en inglés. En esta zona la estabilidad atmosférica es alta, puesto que el movimiento del aire es descendente, evitando la formación de mal tiempo. Los vientos giran en el mismo sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio Norte y se invierten en el hemisferio Sur. Comúnmente se le conoce como anticiclón.

188

### 14.1.3 Vaguada o surco

Es una configuración isobárica en la que a partir de una baja presión las isobaras se deforman alejándose del centro en forma de U. La parte trasera de la vaguada causa acumulación de vapor de agua y está asociada al mal tiempo (figura 95).

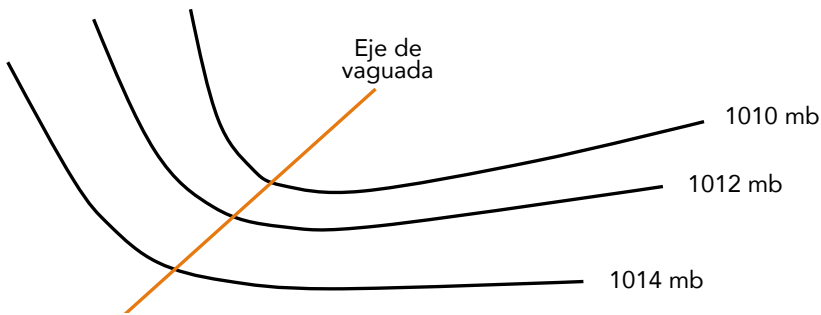


Figura 95. Eje de una vaguada.  
Fuente: elaboración propia.

### 14.1.4 Dorsal o cuña

Es una configuración isobárica en la que a partir de una alta presión las isobaras se deforman alejándose del centro en forma de U. Generalmente este fenómeno está asociado a buen tiempo, la humedad es poca y el cielo suele estar muy despejado (figura 96).

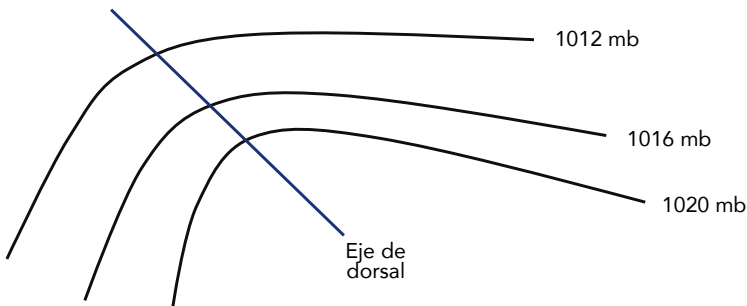


Figura 96. Eje de una dorsal.  
Fuente: elaboración propia.

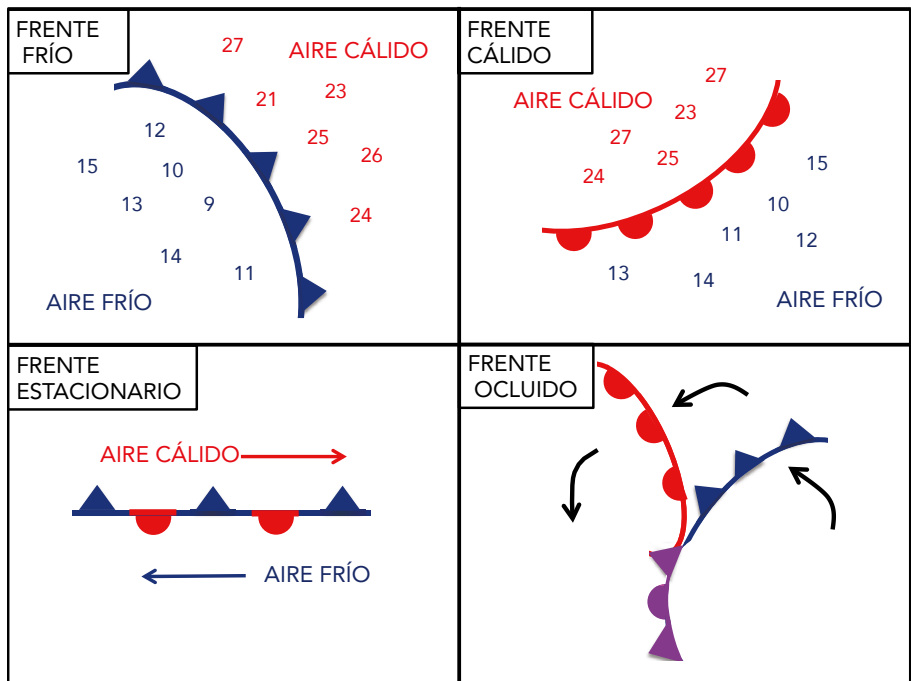


### 14.1.5 Frentes atmosféricos

En los mapas de superficie también se representan los frentes atmosféricos. Un frente es la zona de transición entre dos masas de aire que tienen diferentes densidades (diferencias en temperatura y contenido de humedad), lo que causa inestabilidad atmosférica y, por consiguiente, nubosidad y precipitaciones.

Si una masa de aire frío se desplaza hacia una zona de mayor temperatura, se le denomina frente frío y se simboliza mediante triángulos azules; si es la masa caliente la que avanza sobre la masa de aire frío, se le denomina frente cálido y se representa con semicírculos rojos. Un frente estacionario es aquel que simboliza la separación entre dos masas de aire con temperatura distinta, pero sin desplazamiento de una sobre la otra, y un frente ocluido es la combinación entre un frente cálido y un frente frío con desplazamiento. Todos los tipos de frente estarán siempre unidos por una línea que representa su área de influencia (figura 97).

189



**Figura 97.** Distintos tipo de frentes atmosféricos.  
Fuente: elaboración propia.

La localización de Colombia en la zona tropical no permite la formación de frentes atmosféricos; sin embargo, sí es posible que en los extremos norte (límites fronterizos sobre el mar Caribe) y sur (Amazonia) se sientan los efectos de algunos frentes fríos que logran alcanzar latitudes tropicales, especialmente durante los meses de invierno de cada hemisferio.

### 14.1.6 Condiciones atmosféricas reportadas en los aeródromos

En Colombia pueden encontrarse mapas de análisis de superficie que combinan la información sinóptica con las condiciones predominantes en los aeródromos principales. Normalmente se especifica el fenómeno predominante, la presión altimétrica, temperatura, temperatura del punto de rocío, nubosidad y dirección e intensidad del viento (figura 98).

190

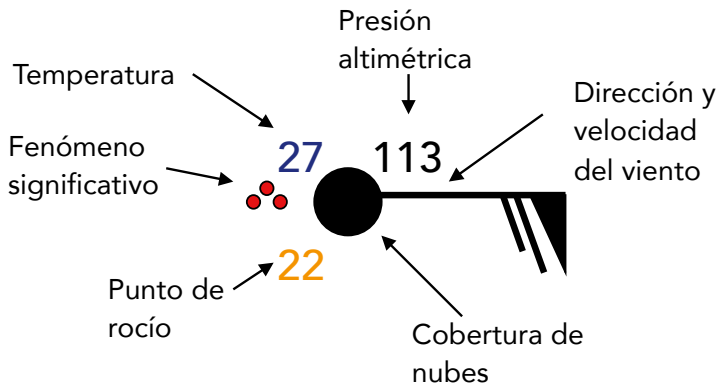


Figura 98. Datos de una estación en superficie.

Fuente: elaboración propia.

**Lectura de la presión.** En este tipo de diagrama, los datos de presión altimétrica son reportados en milibares, pero solo se escriben las tres últimas cifras. Por ejemplo, una presión de 1 011,3 será reportada como 113, tal como se muestra en la figura 98.

**Lectura de fenómenos meteorológicos.** Los fenómenos meteorológicos más comunes representados en mapas de tiempo presente son resumidos en la tabla 26.

Tabla 26. Fenómenos reportados en mapas de tiempo presente.











Llovizna	,	Nieve	*
Lluvia ligera	••	Neblina	≡
Lluvia moderada	•••	Niebla extensa	≡≡
Lluvia fuerte	••••	Calima extensa	∞
Chubasco	▽	Granizo	△
Tormenta	⚡	Humo extenso	~

Fuente: Modificado de NOAA (s.f.d).





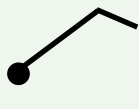

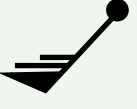
**Lectura de cobertura de nubes.** La cobertura de nubes o cobertura del cielo puede ser reportada según la tabla 27.

**Tabla 27.** Representación de la cobertura de cielo, en octas.

Cielo despejado		5/8 de cielo cubierto	
1/8 de cielo cubierto		6/8 de cielo cubierto	
2/8 de cielo cubierto		7/8 de cielo cubierto	
3/8 de cielo cubierto		8/8 de cielo cubierto	
4/8 de cielo cubierto		Cielo no observable	

**Fuente:** Modificado de NOAA (s.f.d).

**Lectura del viento.** El viento se representa mediante una línea que indica de dónde viene (cola) y para dónde va (punta o círculo). La cola puede finalizar en barbas o banderas; dependiendo de la velocidad, las banderas representan 50 kt, cada barba 10 kt y cada media barba 5 kt. Para conocer la intensidad total del viento, se suman todas las banderas y barbas que se encuentren en el eje central. La figura 99 ejemplifica distintas situaciones de dirección e intensidad del viento.

Lectura del viento					
<b>Símbolo</b>					
<b>Isobaras</b>	calma	5 kt	10 kt	15 kt	65 kt
<b>Isotacas</b>	ninguna	del NW	del NE	del SE	del SW

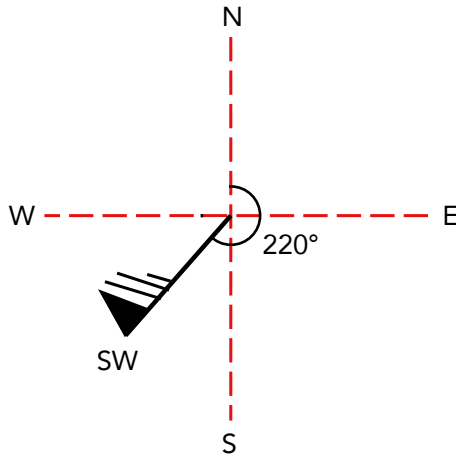
**Figura 99.** Representación del viento en el hemisferio norte.

**Fuente:** elaboración propia.

Ejemplo: De acuerdo a la figura 100, se puede dibujar una rosa de los vientos en la punta del eje y, desde el Norte (N) hasta el eje del viento, trazar un ángulo que ayude a determinar la dirección de donde proviene el viento. En este caso, la dirección del viento es de los 220° o del SW con 75 kt de intensidad (50 + 10 + 10 + 5).

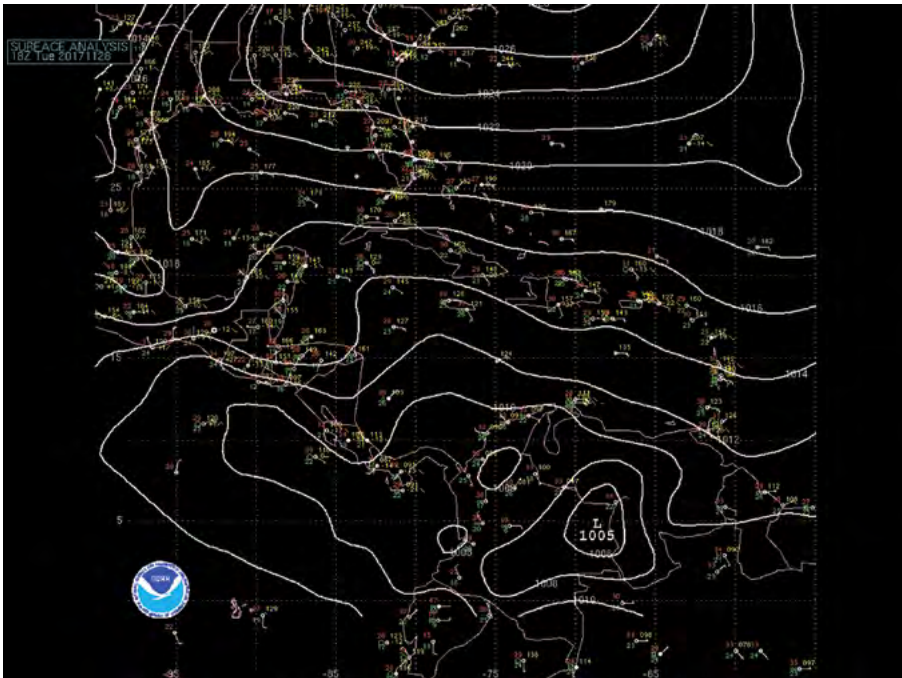






**Figura 100.** Cálculo de intensidad del viento.  
**Fuente:** elaboración propia.

La interpretación de mapas de superficie (figura 101) facilita la identificación de zonas de buen y mal tiempo según en el mapa se indique una zona de alta (H) o baja presión (L). En algunos de estos mapas también se representa la zona de confluencia intertropical (ZCIT) asociada a nubosidad de desarrollo vertical y se señalan las condiciones atmosféricas de los aeródromos.



**Figura 101.** Mapa de análisis de superficie del 28 de noviembre de 2017 a las 18 UTC.  
**Fuente:** Tomado de NOAA (s.f.c).



# 14.2 Mapa de tiempo significativo

A diferencia de los mapas sinópticos que presentan información de las condiciones atmosféricas actuales, los mapas de tiempo significativo son utilizados para pronosticar la ocurrencia de aquellos fenómenos meteorológicos que, por su relevancia, pueden afectar la actividad aérea. Su elaboración está reglamentada según OACI (2007), son conocidos como Significant Weather (SIGWX) forecasts y están divididos así:

SIGWX Niveles altos	Entre 250 FL y 630 FL
SIGWX Niveles medios	Entre 100 FL y 250 FL
SIGWX Niveles bajos	Entre SFC y 100 FL. También pueden emitirse desde SFC hasta 150 FL en zonas montañosas

En los mapas SIGWX de niveles altos y medios se indican:

- Ciclones tropicales con velocidades iguales o superiores a 63 km/h (34 kt)
- Líneas de turbonada severas
- Turbulencia moderada o severa
- Englamamiento moderado o severo
- Tormenta de arena
- Áreas de formación de cumulonimbus
- Áreas de formación de nubes no convectivas asociadas con la turbulencia y englamamiento
- Nivel de vuelo de la tropopausa (Recordar que puede estar asociada a TAC)
- Corrientes en chorro
- Erupciones volcánicas
- Liberación accidental de materiales radiactivos a la atmósfera.

**Lectura de fenómenos significativos.** Los símbolos de los fenómenos meteorológicos más utilizados en los mapas de tiempo significativo se resumen en la tabla 28.



**Tabla 28.** Fenómenos reportados en mapas de tiempo significativo.

Turbulencia moderada		Fuerte línea de turbonada	
Turbulencia fuerte		Oscurecimiento de montañas	
Engelamiento leve		Erupción volcánica	
Engelamiento moderado		Altitud de la isocero	
Engelamiento fuerte		Tormenta tropical	
Temperatura de la superficie del mar en °C		Huracán	
Borde de la masa nubosa		Límite del área de turbulencia	
Altura de la tropopausa		Materiales radiactivos en la atmósfera	
Altura mínima de la tropopausa		Tope y base del fenómeno en nivel de vuelo	
Altura máxima de la tropopausa		Línea de convergencia	
Altura de las olas en metros		Corriente en chorro	
Viento en superficie (>30 kt)		Zona de confluencia intertropical (ZCIT)	

Fuente: Modificado de OACI (2007).

**Cantidad de nubes.** La forma de representar la cantidad de nubes se resume en la tabla 29.

**Tabla 29.** Capacidades del canal en la detección de tipo de nubes.

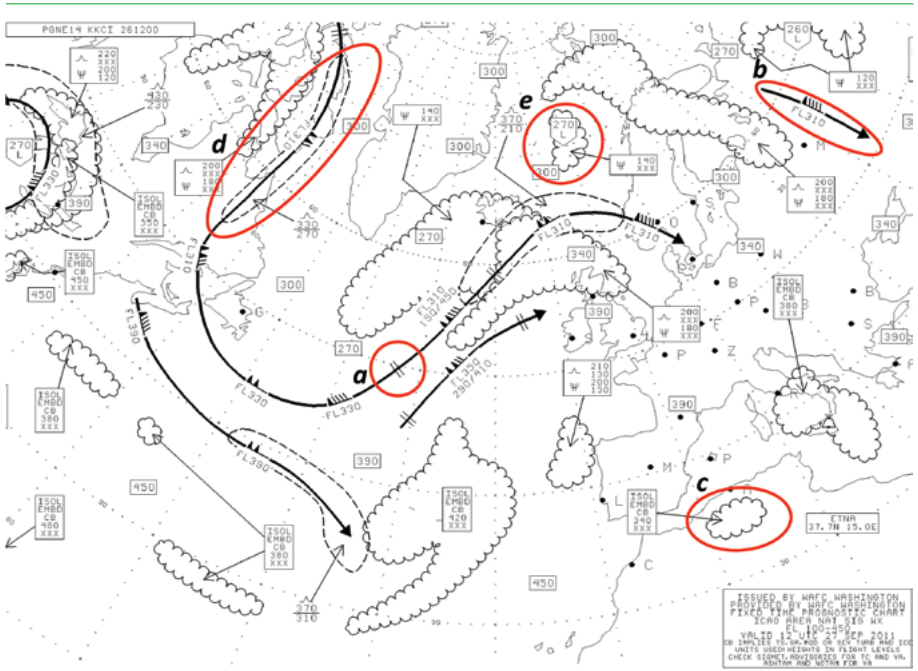
Cantidad			
Nubes excepto cumulonimbos		Cumulonimbos solamente	
Nubes escasas (1/8 a 2/8).	FEW	Aislados «Isolated» (<1/8)	ISOL
Nubes dispersas (3/8 a 4/8).	SCT	Bien separados «Occasionally» (1/8 – 4/8)	OCNL
Nubes fragmentadas (5/8 a 7/8).	BKN	Poco separados «Frequently» (>5/8)	FRQ
Cielo cubierto (8/8).	OVC	Mezclados con otras nubes. «Embedded»	EMBD

Fuente: Modificado de OACI (2007).



Los mapas de tiempo significativo se actualizan cada 6 horas y se tienen disponibles a las 00, 06, 12 y 18 UTC. La figura 102 es un ejemplo de mapa de tiempo significativo para el día 27/SEP/2011 a las 12 UTC.

En la figura 102 se encuentran diferentes fenómenos meteorológicos, los cuales se denotan con las letras **a**, **b**, **c**, **d** y **e**, con la siguiente interpretación:



**Figura 102.** Mapa de tiempo significativo valido desde las 12 a las 18 UTC del 27 de septiembre de 2011.

**Fuente:** Tomado de WAFC WASHINGTON (s.f).

**Zona a:** Se marca con doble barra las diferencias de velocidad mayores a 20 kt dentro del jet stream, en este caso se marca el paso de 90 a 130 kt de velocidad.

**Zona b:** Jet Stream con viento de 90 kt y afecta principalmente el FL 310. Solo se representan velocidades del viento superiores a 80 kt.

**Zona c:** Área con cumulonimbos aislados y mezclados con otro tipo de nubes, se desconoce la altura de la base y se extiende hasta el FL 340.

**Zona d:** Área con turbulencia moderada, afecta las aeronaves que se encuentran entre FL 270 y FL 330, la afectación más grande se presenta en el FL 310.

**Zona e:** Área con engelamiento moderado, el fenómeno se presenta desde un altura mínima desconocida hasta el FL 140.



# 14.3 Fenómenos especiales – huracanes

196

Los huracanes (ciclones tropicales) se forman sobre las cálidas aguas tropicales a partir de sistemas de baja presión que solo son informados por los centros meteorológicos una vez evolucionan a depresión tropical, tormenta tropical y, finalmente, adquieren la categoría de huracán. Las depresiones tropicales se forman cada tres o cuatro días sobre las aguas del océano Atlántico, típicamente entre 5 y 30 grados de latitud norte moviéndose de este a oeste y desde el 1 de junio hasta el 30 de noviembre de cada año (NOAA, 2013).

NOAA (s.f.a) resume el trabajo de varios investigadores donde se definen las condiciones favorables para la formación e intensificación de un huracán:

- Temperaturas oceánicas >26,5 °C a lo largo de una profundidad >50 m.
- Una atmósfera que se enfríe lo suficientemente rápido con una altura tal que sea potencialmente inestable a la convección húmeda.
- Capas relativamente húmedas cerca de la troposfera media (5 km).
- Una distancia mínima de al menos 500 km del ecuador.
- Un sistema débilmente organizado con un giro considerable y un flujo de entrada de bajo nivel.
- Valores menores a 20 kt de cizalladura del viento vertical entre la superficie y la troposfera superior.

El Centro Nacional de Huracanes (NHC), adscrito a la NOAA, es la dependencia oficial para el Caribe encargada de vigilar y hacer seguimiento a los huracanes que se forman anualmente al noroeste del océano Pacífico y en el Atlántico.

La figura 103 muestra un ejemplo de cómo el NHC permite visualizar la tormenta tropical Ophelia (20/SEP2011) desde dos perspectivas: primero un plano general del Pacífico y el Caribe donde se destacan los ciclones tropicales en cualquier punto de su proceso de formación y se evalúa la probabilidad de ocurrencia de las depresiones tropicales en las categorías baja, media y alta (figura 103a). La segunda visualización corresponde al pronóstico de evolución y desplazamiento de la tormenta (figura 103b).

El proceso de formación de un huracán depende única y exclusivamente de la velocidad del viento y, una vez alcanza ese estatus, se divide en cinco categorías, las cuales NOAA (s.f.b) ha adaptado de la escala original de Herbert Saffir y Bob Simpson.

**Tabla 30.** Proceso de formación del huracán (mph).

Proceso de formación del huracán (mph)	
D: Depresión tropical	<39
S: Tormenta tropical	39 – 73
H: Huracán	74 – 110
M: Huracán mayor	>110

Fuente: Modificado de NOAA (s.f.b).



Tabla 31. Categorías de huracán según Saffir-Simpson (mph).

Categorías de huracán según Saffir-Simpson (mph)	
D: Depresión tropical	<39
S: Tormenta tropical	39 – 73
H: Huracán	74 – 110
M: Huracán mayor	>110

Fuente: Modificado de NOAA (s.f.b).

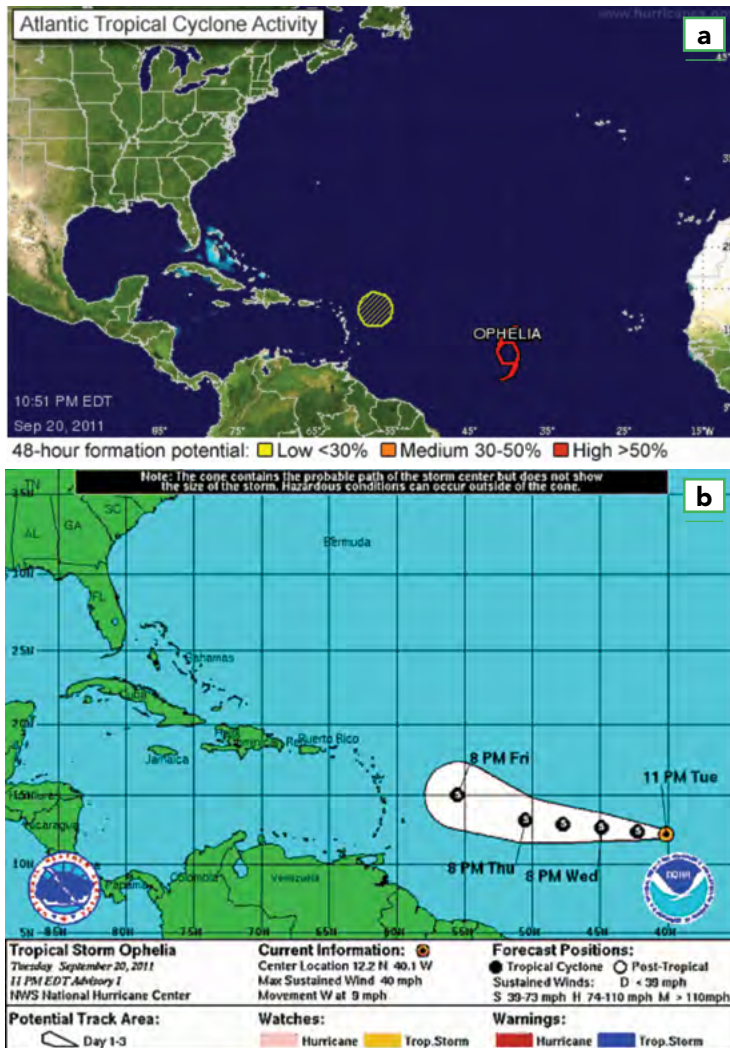


Figura 103. Tormenta tropical Ophelia.

Fuente: Tomado de NOAA (s.f.c).





# Capítulo 15.

## Radar meteorológico

---

15.1 Tipos de Radar

15.2 Partes del radar

15.3 Cálculo de la altitud del haz

15.4 Problemas asociados al cubrimiento radar

15.5 Volumen de muestreo en un radar

15.6 Reflectividad

15.7 Interpretación de las imágenes radar



200 Los radares meteorológicos detectan agua precipitable<sup>36</sup>, calculan su posición y estiman su composición, pero no detectan formación de nubes. Las ventajas de los datos radar sobre los satélites meteorológicos son su alta resolución temporal (una imagen cada 5 minutos) y espacial (150 m x 1,7 km a 100 km de distancia del radar), la posibilidad de analizar una tormenta en el eje vertical y horizontal, y una representación más fidedigna del campo de precipitación.

Las ventajas del radar se incrementan cuando es utilizado como una red de cubrimiento nacional (figura 104). En la actualidad, Colombia cuenta con cinco radares meteorológicos de doble polarización (representados en color negro y rojo) y se contempla la adquisición de tres radares adicionales (azul intermitente). La cercanía de Colombia a Curazao le permite al departamento de la Guajira estar cubierto por el radar del país vecino (violeta).

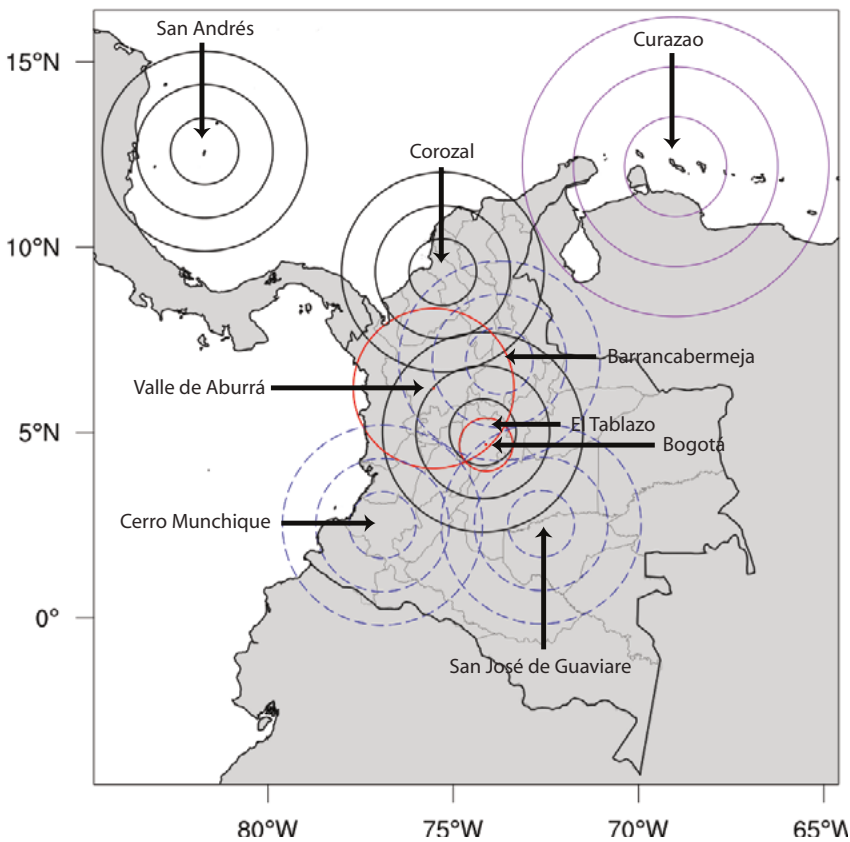


Figura 104. Ubicación de los radares meteorológicos en Colombia.

Fuente: elaboración propia.

36 Cantidad de vapor de agua con potencial de condensarse y convertirse en precipitación.



No todos los radares son iguales, se diferencian según el tipo del radar, frecuencia (banda), ángulos de elevación, alcance y especificaciones propias del terreno donde fueron instalados. En el caso colombiano, estas características se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 32. Especificaciones técnicas de los radares colombianos.

	El Tablazo	Corozal	San Andrés	Curazao	Valle de Aburrá	Bogotá
Ubicación	5,0118 N 74,2037 W	9,3308 N 75,2827 W	12,5883 N 81,7080 W	12,1784 N 68,9494 W	6,1908 N 75,5286 W	4,6751 N 74,1139 W
Elevación antena	3 544 m	146 m	33 m	88 m	2 813 m	2 570 m
Fecha de entrada en operación	FEB/2012	NOV/2012	NOV/2014	OCT/2015	ENE/2012	FEB/2016
Institución propietaria	UAEAC			MDC	SIATA	IDIGER
Alcance máximo	300 km			450 km	240 km	80 km
Tipo	Vaisala WRM200				EEC	
Ángulos de elevación	0°, 0,5°, 1°, 2°, 4,5°, 7°, 10°, 15°, 20° y 30°	0,5°, 1°, 2°, 3°, 5°, 7°, 10°, 15°, 20° y 30°	0,5°	0,5°, 1°, 2°, 4°	0,5°, 1°, 2°, 4° Barridos verticales	0°, 0,5°, 1,5°, 2,5°, 3,5°, 4,5°, 5°, 10°, 15° y 20°
Banda	C					X

Fuente: elaboración propia.

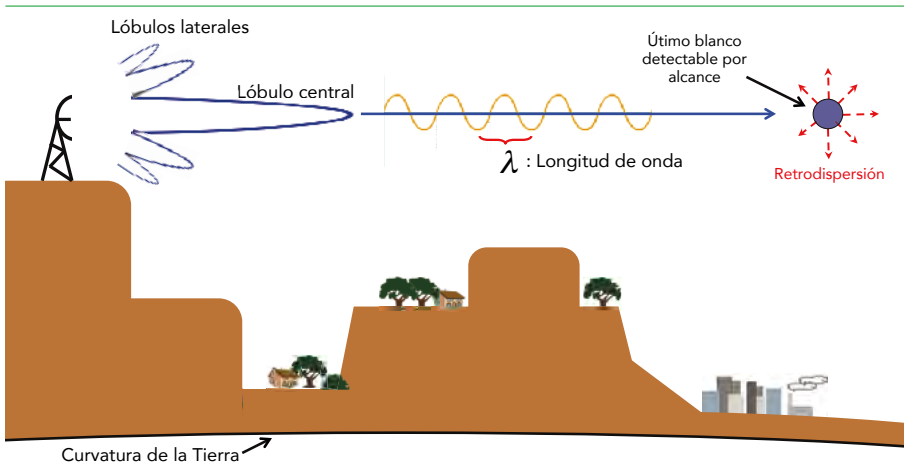
La información en línea proveniente de estos radares puede ser consultada en la página web de las instituciones que los administran según se relaciona:

- Consulta Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil (UAEAC)  
<http://190.27.249.248/radar/index/aoi/CRM/Reflectivity%20Base%200.5%20degree>.
- Consulta Sistema de Alertas Tempranas del Valle de Aburrá (SIATA)  
<http://www.siata.gov.co/newpage/index.php>.
- Consulta Departamento Meteorológico de Curazao (MDC)  
[http://www.meteo.cw/rad\\_still\\_ppi.php?Lang=Eng&St=TNCC&Sws=R11](http://www.meteo.cw/rad_still_ppi.php?Lang=Eng&St=TNCC&Sws=R11).
- Consulta Instituto Distrital de Gestión del Riesgos y Cambio Climático (IDIGER)  
<http://www.sire.gov.co/idiger>.

El término Radar proviene de *Radio Detection And Ranging*, en otras palabras: detectar y medir distancias por medio de ondas de radio. Los radares meteorológicos funcionan mediante la emisión de pulsos de energía electromagnética con diferentes longitudes de onda.

Por efecto de la difracción, esta energía se concentra principalmente en un lóbulo central y en lóbulos laterales de menor energía; cuando el haz choca contra las gotas de lluvia, se dispersa en todas las direcciones (figura 105), regresando una pequeña porción de la señal hasta el radar. Esta pequeña señal es analizada por el radar y decodificada en términos de localización e intensidad del fenómeno. A través del cambio de posición de las partículas en tiempo y en espacio, se deriva la dirección e intensidad del viento.





**Figura 105.** Distribución lobular de la energía emitida por el radar.  
**Fuente:** elaboración propia.

Los radares meteorológicos operan en tres bandas típicas (longitud de onda) del espectro electromagnético:

**Tabla 33.** Bandas típicas de los radares meteorológicos.

Banda	Longitud de onda central ( $\lambda$ )	Frecuencia	Características
X	3 cm	10 GHz	Poca penetración, antena pequeña, sensible a gotas muy pequeñas, alcance máximo limitado por atenuación <sup>37</sup> .
C	6 cm	6 GHz	Mediana penetración, antena mediana, sensible a gotas medianas.
S	12 cm	3 GHz	Buena penetración, antena grande, sensible solo a gotas grandes, menor pérdida de energía por atenuación.

**Fuente:** elaboración propia.

## 15.1 Tipos de radar

**Radar Doppler:** Mediante el análisis de las diferencias entre las frecuencias emitidas y recibidas, detecta la velocidad y dirección de las partículas en movimiento respecto al radar. Si la frecuencia disminuye o aumenta, el blanco se aleja o se acerca al radar. Este tipo de radares miden directamente la dirección radial del viento y detectan automáticamente fenómenos como el *wind shear* y las ráfagas de viento.

Este radar funciona bajo el principio de Christian J. Doppler (1853), quien descubrió que como la longitud de onda ( $\lambda$ ) no varía, la velocidad ( $v$ ) de un objeto en movimiento era directamente proporcional al corrimiento de la frecuencia ( $f$ ) causado por ese objeto. Esta relación se aplicaría directamente si el blanco siempre se moviera en la misma

<sup>37</sup> La atenuación es definida por Collier (1996) como la reducción de intensidad de la onda electromagnética a lo largo de su ruta.

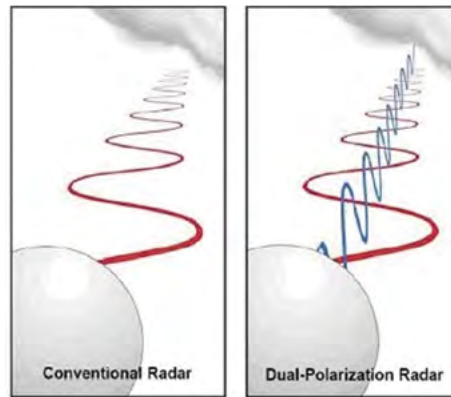


dirección del haz, pero como esto difícilmente se presenta, es necesario contemplar el ángulo ( $\varphi$ ) formado entre la velocidad real del blanco analizado y la velocidad radial (desde o hacia el radar), así:

$$f = \frac{2v}{\lambda} \cos(\varphi)$$

**Doble Polarización:** Este tipo de radar, además de detectar blancos y su velocidad radial, es capaz de identificar y clasificar el tipo de precipitación entre gotas, nieve y granizo; minimiza problemas de atenuación, problemas de bloqueo parcial del haz y obtiene mejores estimaciones cuantitativas de lluvias. 203

La doble polarización o doble orientación hace referencia a la capacidad del radar de alternar pulsos con orientación horizontal (campo eléctrico) y vertical (campo magnético), a diferencia del radar con polarización normal o sencilla, que solo le permite transmitir pulsos en orientación horizontal (figura 106).



**Figura 106.** Radar de doble polarización.  
Fuente: Tomado de MetEd (2016).

Esto es relevante, porque la mayoría de las partículas meteorológicas no son esféricas y por lo tanto retrodispersan mayor potencia bajo pulsos de polarización horizontal que bajo pulsos de polarización vertical. Estas diferencias, en el tipo de respuesta a la orientación del pulso, permiten conocer información adicional sobre el tamaño, tipo y estado (agua líquida o cristales de hielo) de las partículas analizadas. Las orientaciones requieren, cada una, su propia guía de onda, ambas llegando al foco de la antena.

## 15.2 Partes del radar

Los radares difieren en sus componentes según su uso y capacidad; sin embargo, las características y partes comunes pueden simplificarse en sus componentes básicos (figura 107).



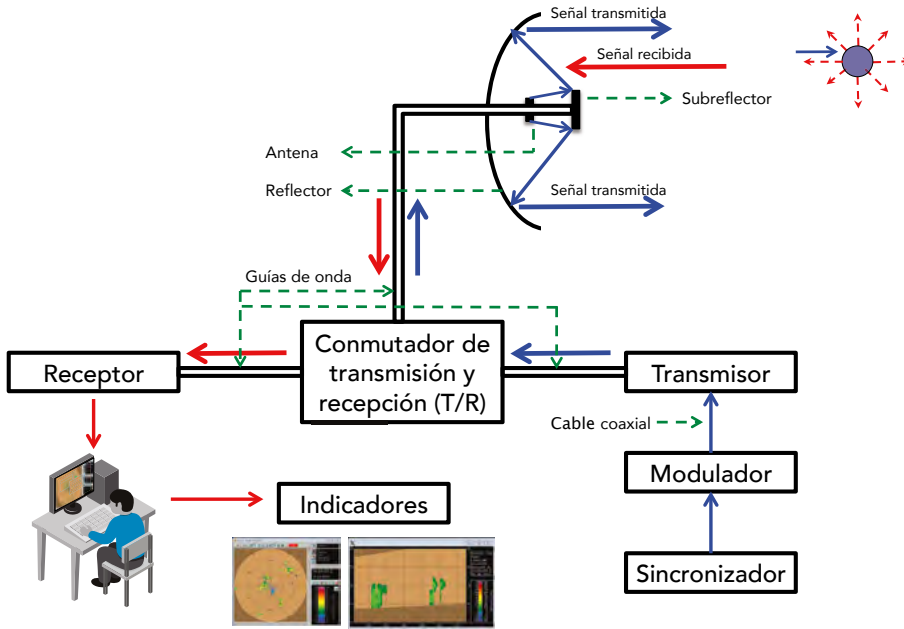


Figura 107. Esquema básico de un radar.  
Fuente: elaboración propia.

### 15.2.1 Transmisor

El transmisor genera la frecuencia de salida, desde la antena a la atmósfera. Se pueden encontrar de tres tipos:

Estado sólido	Pueden transmitir señales de hasta 50 W de potencia.
	Normalmente se combinan para alcanzar un nivel de potencia aceptable.
	Se han usado en radares a bordo de aeronaves.
Magnetrón	Tamaño pequeño y gran potencia, ideal para radares a bordo de aeronaves.
	Pueden transmitir señales de hasta 500 kW de potencia.
Klystron	No mantienen la misma frecuencia y estabilidad de fase, pero usan otros sistemas que recuerdan la frecuencia y fase de cada pulso.
	Son de gran tamaño y amplifican significativamente la señal emitida.
	Pueden transmitir señales de hasta 2 MW de potencia.
	Mejoran la medición de la velocidad radial toda vez que generan exactamente la misma frecuencia y fase inicial de un pulso a otro.

### 15.2.2 Modulador

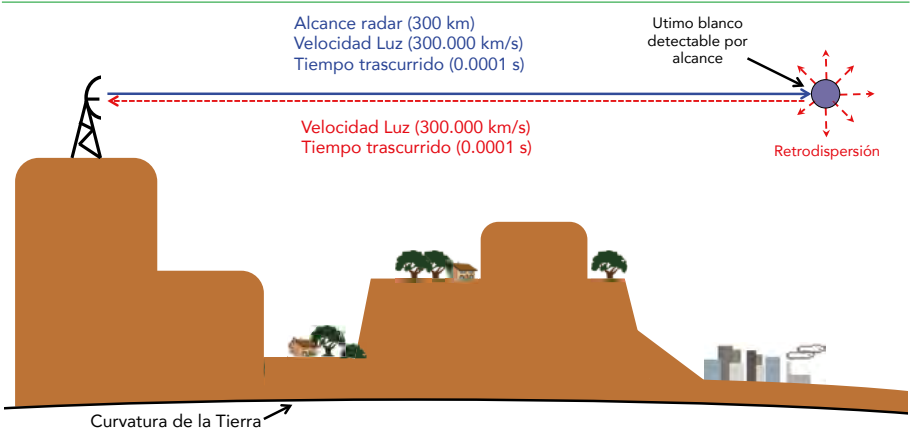
Proporciona al transmisor la energía suficiente para garantizar su permanente funcionamiento, también lo controla conectándolo y desconectándolo, de tal manera que genera la amplitud y frecuencia de la onda transmitida; esto se conoce como PRF (*Pulse Repetition Frequency*), la cual se mide en pulsos electromagnéticos, ciclos por segundo o Hertz (1 Hz = 1 ciclo / s).



El alcance máximo (nominal<sup>38</sup>) de un radar se puede ajustar especificando la PRF. Se requiere una frecuencia de repetición de pulsos que le permita al primer pulso viajar dos veces el alcance máximo deseado del radar (trayectoria de ida y regreso), antes de emitir el siguiente pulso.

Por ejemplo, si se desea operar a un alcance de 300 km, se requieren 600 km entre pulsos consecutivos para que el haz pueda ser emitido y devolverse (figura 108). A la velocidad de la luz (30 000 km/s), se requieren de 0,002 segundos para hacer este recorrido, lo que equivaldría a 500 pulsos por segundo (1/0,002 s) o una PRF de 500 Hz. No se puede ajustar de forma independiente la PRF y el alcance máximo nominal del radar. Si se desea un alcance alto, la PRF debe ser baja; si la PRF es alta, se limita el alcance máximo nominal.

205



**Figura 108.** Alcance máximo de un radar y PRF.

**Fuente:** elaboración propia.

De esta manera también puede conocerse la distancia a la que los blancos se encuentran del radar. Si, por ejemplo, el tiempo transcurrido entre la señal emitida y recibida es de 0,00012 s (t), el tiempo utilizado para impactar con el blanco debería ser la mitad, es decir 0,00006 s (t/2), considerando que este desplazamiento se realiza a la velocidad de la luz (c), la distancia (d) del blanco al radar sería de 18 km según la siguiente ecuación:

$$d = c \frac{t}{2}$$

$$d = 300\,000 \text{ km/s} \left( \frac{0,00012 \text{ s}}{2} \right)$$

$$d = 18 \text{ km}$$

### 15.2.3 Guías de onda

Son las conductoras entre el transmisor, el receptor y la antena, usadas para transmitir altas frecuencias y evitar la pérdida de energía que producirían cables comunes o cables

<sup>38</sup> Nominal es un valor teórico e ideal; sin embargo esto está asociado a un valor no necesariamente real.



coaxiales (usados comúnmente en radiofrecuencias). Su forma rectangular transmite el campo eléctrico en la parte más ancha y el campo magnético en la más angosta.

---

## 15.2.4 Antena

206 Es un dispositivo direccional encargado de enviar la señal del radar a la atmósfera, enfocando la energía en una dirección específica que le permite detectar blancos puntuales. Está compuesta por el reflector y el subreflector, los cuales se encargan de aumentar la potencia. Cuanto más grande sea el reflector, más exactitud presentará el radar y más estrecho será el haz de la antena.

Las características de las antenas varían y se diseñan según la longitud de onda enviada por el transmisor. A medida que la longitud de onda aumenta, se requiere una antena con mayor diámetro del reflector, el cual oscila entre 30 cm a 9 m. Las antenas también presentan diferente ganancia, definida como el cociente entre la cantidad de energía irradiada en la dirección de la antena y la que irradiaría una antena isotrópica<sup>39</sup> alimentada por el mismo transmisor; este factor se indica en decibelios (dBi<sup>40</sup>), lo que denota una relación directa con la antena isotrópica. Para alcanzar el máximo de potencia y por lo tanto, una mayor ganancia, se utiliza 1° máximo de ancho de haz.

---

## 15.2.5 Conmutador (T/R)

Teniendo en cuenta que la antena es usada de forma intermitente con potencias muy distintas, que van desde  $10^{-14}$  W por parte del receptor hasta  $2 \times 10^6$  W en el caso del transmisor, el conmutador es el encargado de regular el uso de la antena por estos dos componentes, de tal manera que el receptor no se vea afectado por las altas potencias emitidas por el transmisor. La energía del haz en su recorrido de ida y regreso se afecta según la distancia radial ( $r$ ), de la forma  $(1/r^2)$   $(1/r^2) = (1/r^4)$ , consecuentemente la energía devuelta por un blanco disminuye de forma inversa con la cuarta potencia de la distancia. Esto hace que, a pesar de las enormes cantidades de energía emitidas, se reciban ecos sumamente débiles (Rosengaus, 1995).

---

## 15.2.6 Receptor

Este dispositivo detecta y amplifica las señales recibidas por la antena, envía la información a un detector de fase, el cual compara la fase de la señal transmitida con la fase de la señal recibida y determina la diferencia en términos de desplazamiento de fase. Como las diferencias de señal pueden llegar a ser muy amplias, se usan receptores logarítmicos, los cuales producen una salida proporcional al logaritmo de la potencia de entrada, conservando un rango desde 0 a 80 dB.

---

## 15.2.7 Indicadores

Un indicador es la forma de representar los datos radar, de tal forma que sean entendibles ante la percepción humana. Los más comunes son el indicador horizontal (PPI) y el indicador vertical (RHI).

---

39 Se considera que una antena es isotrópica cuando transmite igual intensidad de energía en todas las direcciones.

40 Decibelios medidos utilizando una antena isotrópica como referencia.



- PPI (Plan Position Indicator).** Este indicador muestra, por lo general, los blancos detectados por el haz del radar con el ángulo de elevación más cercano a la superficie terrestre, es muy intuitivo para el observador y mediante la integración de anillos de rango (o de distancia), de mapas geopolíticos y contornos del terreno, facilita la ubicación exacta del blanco. La figura 109, por ejemplo, son PPI del radar de Corozal del día 31 de julio de 2015 a las 19:40 Z, se muestran a la izquierda los datos tomados por el radar y visualizados en el software básico, en la imagen central se le agregan características especiales que ayudan a detectar la posición exacta del blanco meteorológico y a la derecha se hace un acercamiento a los puntos de interés y se sobreponen rutas aeronáuticas y mapas hídricos.

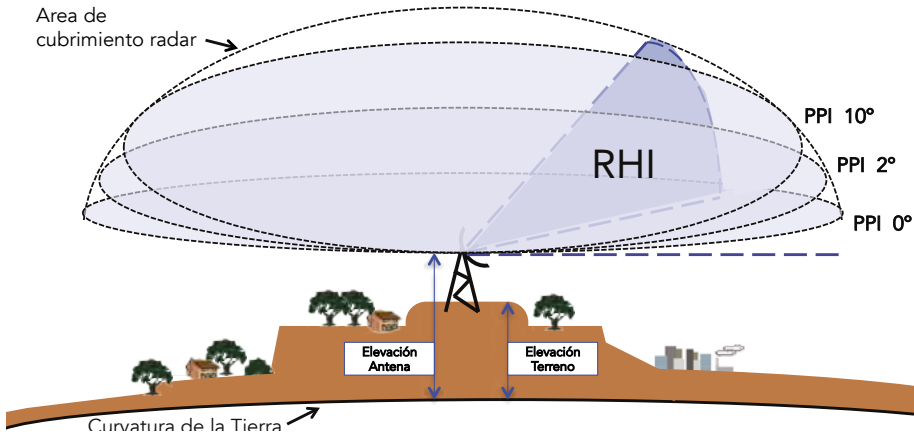


**Figura 109.** Diferentes tipos de PPI del radar de Corozal.  
**Fuente:** elaboración propia.

El PPI representa exclusivamente la información individual de cada uno de los ángulos del radar, donde el ángulo es utilizado operativamente con la exploración más baja. Para el caso del radar de El Tablazo, se utiliza el ángulo de  $0^\circ$  y los radares de Corozal y San Andrés utilizan el ángulo de  $0,5^\circ$  para este indicador. Cuando el haz está cerca al radar, puede detectar agua muy cercana a la superficie, pero pierde su utilidad a medida que el haz se aleja del radar; por ejemplo, a 300 km de distancia, el radar detecta agua sólo por encima de 8 km de altura. Este fenómeno es explicado más adelante en el cálculo de la altitud del haz.

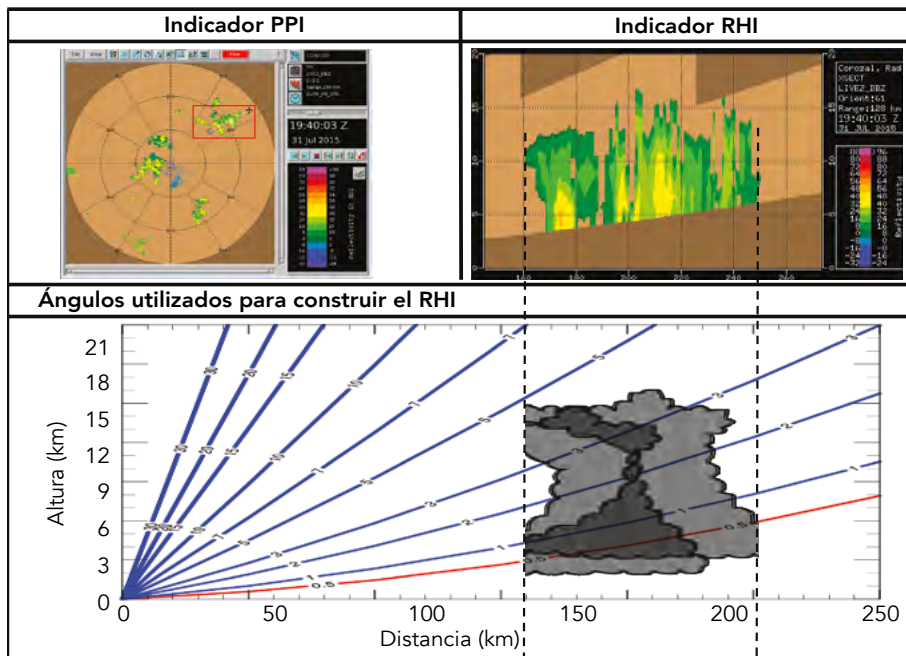
- RHI (Range Height Indicator).** Muestra la altura del blanco combinada con la distancia, sobre y desde el radar. Este indicador debe estar acompañado de un PPI para entender la ubicación del blanco y es vital para conocer la estructura interna de una tormenta y las altitudes de vuelo que están afectando el fenómeno (figura 110).





**Figura 110.** Operación de un radar usando el indicador RHI.  
**Fuente:** elaboración propia.

En la figura 111 se simula el comportamiento de una tormenta ubicada entre 160 y 250 km al NE del radar de Corozaal (eje x) y que compromete alturas desde 3 a 15 km (eje y). Seguramente por debajo de los 3 km hasta la superficie también hay precipitación asociada a la tormenta, pero la altitud del haz más bajo (0,5°) no permite observar por debajo de su recorrido.



**Figura 111.** RHI de una tormenta detectada por el radar de Corozaal.  
**Fuente:** elaboración propia.



## 15.3 Cálculo de la altitud del haz

La trayectoria del haz y su altitud se ven afectados por dos factores primordiales, la refracción y la curvatura de la tierra, siendo esta última influenciada a su vez por la presión atmosférica y la temperatura. Para lograr una aproximación del comportamiento del haz puede considerarse que los rayos del radar se desplazan en línea recta (en realidad tienen una trayectoria curva) con respecto a la Tierra y aplicar el índice de refracción estándar, de tal manera que la altura del haz (H) está dada por la ecuación:

$$H = \sqrt{r^2 + (kR)^2 + 2rkR\sin\varnothing} - kR + h$$

Donde:

r = distancia desde el radar hacia los puntos de cobertura.

k = constante que simula un radio terrestre que el haz pueda recorrer de forma paralela (4/3).

R = radio de la Tierra (6 374 km).

$\varnothing$  = ángulo utilizado por la antena del radar.

h = altura de la antena del radar.

Para interpretar correctamente cómo afecta la altitud del haz una medida de reflectividad, se deben realizar los siguientes pasos:

**Primero:** Conocer la distancia vertical entre el radar y el punto que se está analizando. En este caso, se toma como ejemplo el radar de El Tablazo y las mediciones de reflectividad sobre el *Airport Reference Point* (ARP) del aeropuerto El Dorado en Bogotá.

- Elevación del radar El Tablazo: 3 544 m
- Elevación del ARP en El Dorado: 2 547 m
- Diferencia entre las dos elevaciones: 997 m

**Segundo:** Calcular la distancia horizontal entre el radar y el punto que se está analizando.

- Distancia entre El Tablazo y ARP: 35 km

**Tercero:** Calcular la altura del haz como si el radar estuviera al nivel medio del mar (h = 0), o utilizar la figura 112 para cálculos rápidos.

$$H = \sqrt{35^2 + \left(\frac{4}{3}(6\,374)\right)^2 + 2 * 35 * \frac{4}{3} * 6\,374 * \sin 0^\circ} - \frac{4}{3} * 6\,374 + 0$$

$$H = 72 \text{ m}$$

**Cuarto:** Calcular la distancia vertical total entre el haz y el punto analizado (en este caso el ARP).



$$\text{Distancia Total} = 997 \text{ m} + 72 \text{ m} = 1\,069 \text{ m}$$

El resultado anterior significa que el radar de El Tablazo no podrá detectar precipitación en el ARP por debajo de una altura cercana a los 1 069 m; sin olvidar que este cálculo es realizado sobre el eje central del haz. Esta deficiencia se conoce como la zona invisible al radar, la cual se ve incrementada a medida que el haz se aleja del radar.

210

La figura 112 representa gráficamente el comportamiento del haz del radar, a la izquierda se muestra el cálculo básico de la altura del haz y a la derecha, la lógica que debería aplicarse para entender cómo la altura del haz afecta las mediciones de precipitación realizadas sobre Bogotá.

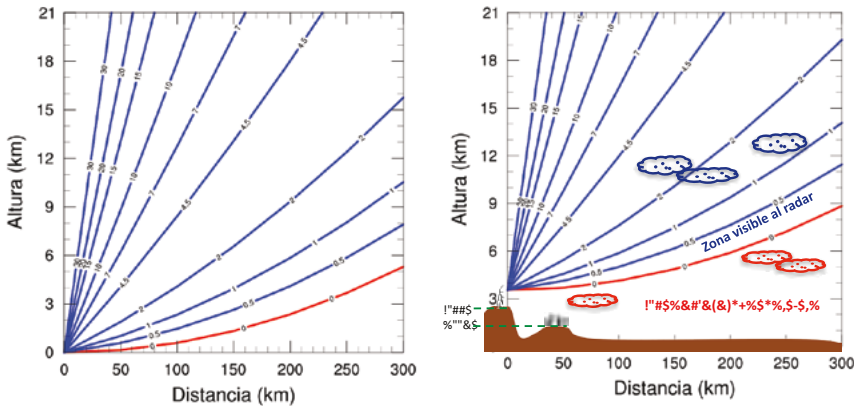


Figura 112. Altura del haz teórico y práctico del radar de El Tablazo.  
Fuente: elaboración propia.

Como se ha podido observar, los ángulos de elevación del radar de El Tablazo no presentan una distribución equidistante entre sí, lo cual podría afectar los resultados obtenidos por los indicadores. Para evitar este inconveniente, se debe regular la distribución vertical de los ángulos de elevación, una buena opción se presenta en la figura 113.

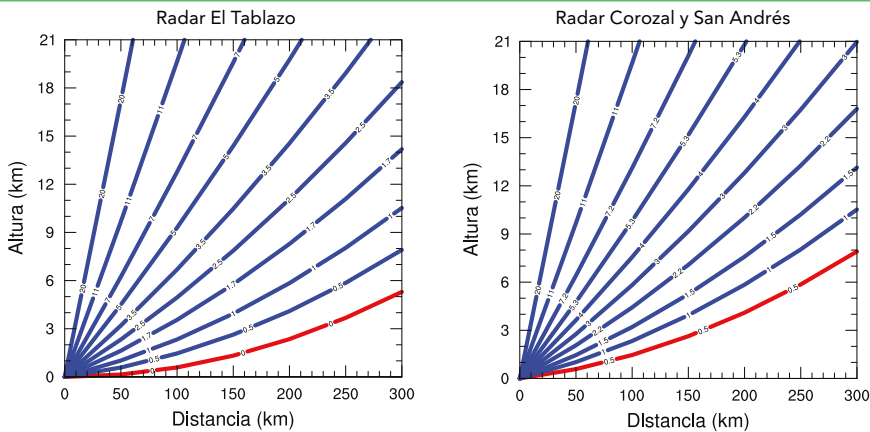
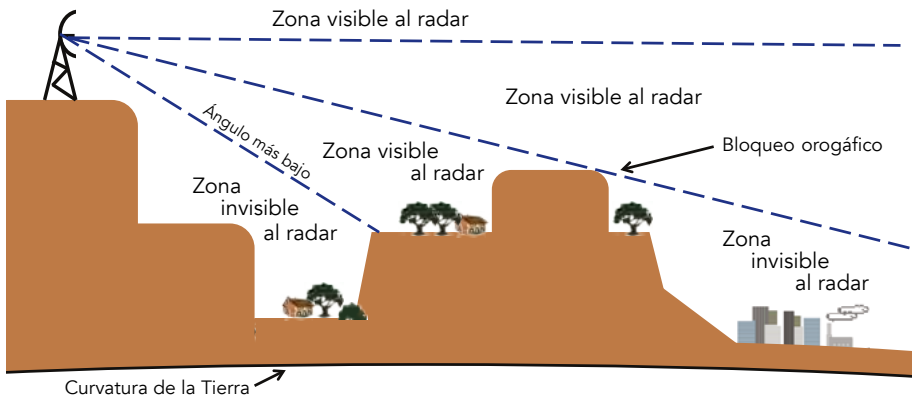


Figura 113. Correcta distribución de los ángulos radar en los radares colombianos.  
Fuente: elaboración propia.



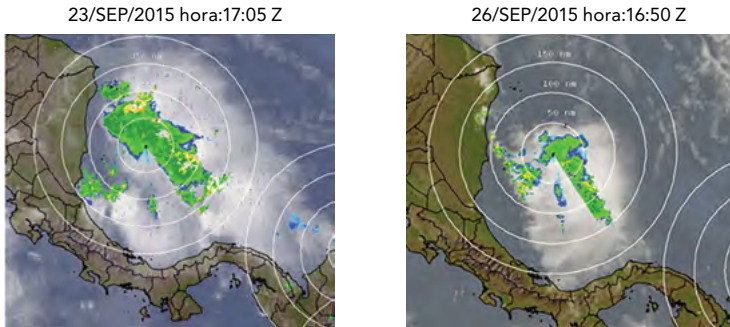
# 15.4 Problemas asociados al cubrimiento radar

Muchos de los problemas asociados a un radar tienen que ver con la ubicación y configuración del radar. Puede decirse que una de las zonas más afectada por la falta de cobertura radar es precisamente donde está instalado. Además, no todos los radares tienen una cobertura real, la mayoría son seriamente afectados por lo que se conoce como bloqueo orográfico. Esquemáticamente, estos dos tipos de afectación son representados mediante la figura 114.



**Figura 114.** Zonas invisibles por cercanía al radar y bloqueo orográfico.  
**Fuente:** elaboración propia.

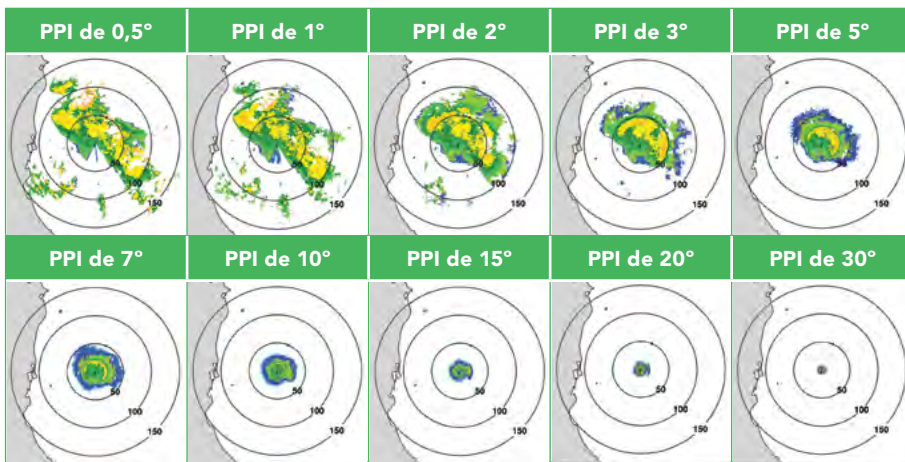
Los bloqueos orográficos son fácilmente detectables en un PPI. En Colombia, el radar más afectado por este tipo de problemas es el radar de San Andrés. La figura 115 muestra dos casos de estudio con el PPI de 0,5° superpuesto sobre una imagen satelital en el canal infrarrojo.



**Figura 115.** Bloqueo orográfico radar de San Andrés.  
**Fuente:** Tomado de UAEAC (s.f.).

Contrastando las imágenes satelitales con la información presentada por el radar, se observa claramente cómo el radar de San Andrés no logra detectar la totalidad de la tormenta en el sector Sur, al encontrarse obstruida la señal por dos montañas cercanas al radar. Para entender cómo los distintos PPI pueden visualizar el fenómeno, se grafica cada uno de ellos de forma individual utilizando el caso del 23 de septiembre de 2015 (figura 116).

212



**Figura 116.** PPI captados por el radar de San Andrés el 23/SEP/15 a las 17:05 Z.  
**Fuente:** elaboración propia.

Como se puede apreciar en el PPI de 0,5°, la cobertura radar en el sur de la isla está ampliamente afectada por dos cerros que causan grandes bloqueos orográficos. El primer cerro que causa interferencia tiene una elevación de 82 m y está ubicado en las coordenadas N 12 31 03 y W 81 43 28, el segundo cerro tiene una elevación de 55 m y se encuentra en las coordenadas N 12 34 30 y W 81 42 39.

Consecuentemente, a medida que el ángulo de elevación es más alto, este supera el bloqueo orográfico y logra detectar la presencia de agua en la atmósfera. Como en el caso del PPI de 1°, que, aunque logra ver un poco más las tormentas al sur de San Andrés, está ampliamente afectado por la relación distancia–altura del haz.

Para entender la manera en la que el radar procesa los datos provenientes de la detección de blancos meteorológicos, es necesario hablar de la resolución del radar.

## 15.5 Volumen de muestreo en un radar

Debido al desplazamiento y apertura del haz, se crean diferentes volúmenes de muestreo, los cuales dependen de la longitud del pulso y de la resolución angular. A continuación



se indica una forma simple de realizar este cálculo, el procedimiento complejo donde se le agregan otras variables puede ser consultado en Rinehart (2007).

Para calcular el largo del volumen de muestreo, el cual está asociado a la longitud de un pulso de radar (ondas electromagnéticas del radar), se asume que cada pulso dura 1  $\mu$ s (microsegundo) y, por lo tanto, avanzaría 300 m a la velocidad de la luz (300 000 000 m/s). Como la longitud radial del volumen de muestreo corresponde a  $\frac{1}{2}$  la longitud del pulso, la longitud radial estaría en el orden de 150 m (15 000 cm), y en esta se pueden encontrar 2 500 ondas individuales de 6 cm cada una para el caso de un radar banda C.

213

El cálculo de la resolución angular, la cual se va ampliando con la distancia al radar, está condicionado por la distancia desde el radar al pulso que se está propagando ( $r$ ), y por la apertura del haz en la horizontal ( $\theta$ ) y en la vertical ( $\phi$ ). Asumiendo que el haz es simétricamente circular ( $\theta = \phi$ ), y del orden de un grado ( $1^\circ$ ), se calcula la apertura del haz en radianes. Los grados y los radianes son dos sistemas diferentes para medir ángulos, así que es necesario realizar una previa transformación aplicando:

$$360^\circ = 2 \pi \text{ radianes}$$

$$360^\circ = 2 (3,1416) \text{ radianes}$$

$$360^\circ = 6,22836 \text{ radianes}$$

$$1^\circ = 0,0174532925 \text{ radianes}$$

El volumen ( $V$ ) de muestreo para un pulso podría calcularse por la fórmula:

$$V = h (\text{area})$$

$$V = h (\pi r_i^2); \quad r_i = r(\theta/2)$$

$$V = h \left( \pi \frac{r\theta}{2} \right)^2$$

De acuerdo con lo anterior, se puede calcular el volumen de muestreo para una distancia radial de 50 km, así:

$$V = 0,15 \text{ km} (3,1416) \left( \frac{50 \text{ km} (0,01745)}{2} \right)^2$$

$$V = 0,09 \text{ km}^3$$

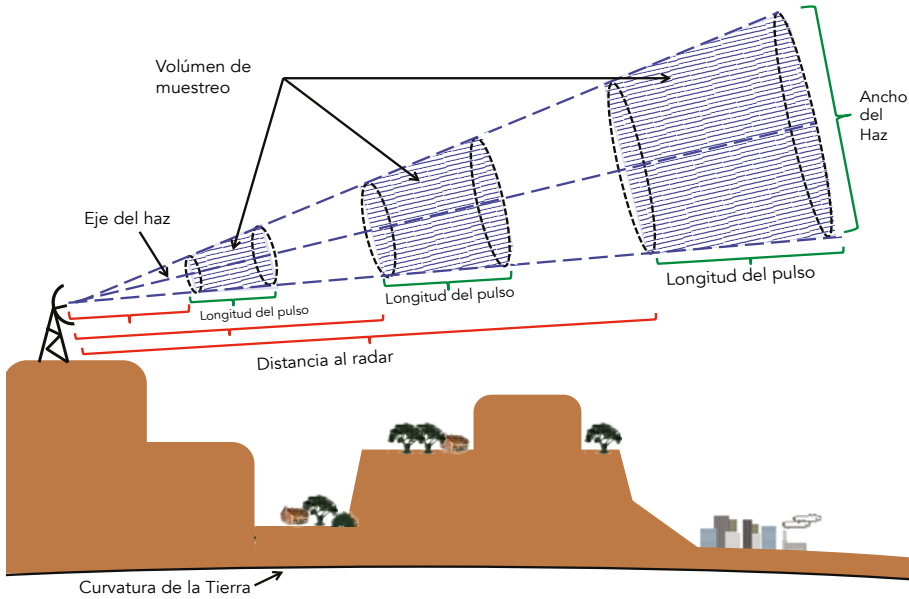
El volumen de muestreo se incrementa a medida que el haz se aleja del radar, permitiendo construir la tabla 34.

**Tabla 34.** Volumen de muestreo respecto a la distancia radial.

Distancia radial ( $r$ )	Volumen ( $V$ )
50 km	0,09 km <sup>3</sup>
100 km	0,36 km <sup>3</sup>
150 km	0,81 km <sup>3</sup>
200 km	1,43 km <sup>3</sup>
250 km	2,24 km <sup>3</sup>
300 km	3,23 km <sup>3</sup>

Fuente: elaboración propia.





**Figura 117.** Longitud y ancho del haz de un radar.

**Fuente:** elaboración propia.

La figura 117 esquematiza el volumen de muestreo realizado por un radar y su relación con la longitud de pulso y ancho del haz.

De acuerdo con lo anterior, se puede inferir que la información proporcionada por el radar resulta de un promedio en el volumen de muestreo que, típicamente, tiene un tamaño constante en la dirección radial  $r$ , de un par de cientos de metros a mil metros, y un tamaño variable y creciente linealmente creciente con  $r$  (Rosengaus ,1999). Esta diferencia de volúmenes medidas por un solo pulso de radar, hace que la resolución sea mucho menor en distancias más grandes y por lo tanto se presenta una pérdida de resolución con la distancia radial.

## 15.6 Reflectividad

Es una medida del promedio de la energía reflejada por cada blanco hacia el radar en el volumen de muestreo, la cual depende de la forma, tamaño, parámetros físicos e intensidad del hidrometeoro.

Debido a la influencia de las grandes partículas en el valor de reflectividad calculado, esta medida se estima como la suma de la sexta potencia de los diámetros ( $D$ ) de todos los blancos ( $N$ ) que dispersan energía en la unidad de volumen muestreada ( $V$ ). Teniendo en cuenta que el tamaño de las gotas se expresa en milímetros y el volumen en metros cúbicos, el factor de reflectividad ( $z_e$ ) del radar se formula en  $mm^6/m^3$ .

$$z_e = \frac{\sum_{i=1} N_i D_i^6}{V}$$



Según Rinehart (2007), la reflectividad es un parámetro meteorológico asociado a cada tormenta, está determinado por la cantidad y tamaño de las partículas presentes en el volumen muestreado, y puede variar desde 0,001 mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup> (niebla) hasta 36 000 000 mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup> (fuertes tormentas de granizo).

Para facilitar la lectura, optimizar las comparaciones y reducir la extensa brecha entre los valores mínimos y máximos de reflectividad, se usa la escala logarítmica.

Rinehart (2007) definió el factor logarítmico de reflectividad como:

215

$$Z = 10 \log \frac{z_e}{1 \text{ mm}^6/\text{m}^3}$$

Donde:

Z = Reflectividad en decibelios (dBZ)

$z_e$  = Reflectividad en  $\frac{\text{mm}^6}{\text{m}^3}$

La nueva escala (logarítmica) permite reducir el rango de valores de reflectividad, de tal manera que 0,001 mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup> equivaldrían a -30 dBZ y 36 000 000 mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup> a 76,5 dBZ.

Se han realizado estudios que pretenden definir la relación existente entre la reflectividad lineal (z) medida en mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup> y precipitación (R); sin embargo, los resultados varían según el tiempo y el lugar. Una de las relaciones más utilizadas es la de Marshall et al. (1947).

$$z_e = 200R^{1,6}$$

Reemplazando la ecuación de Marshall Palmer en  $Z = 10 \log \frac{z_e}{1 \text{ mm}^6/\text{m}^3}$ , se obtiene una relación entre la reflectividad logarítmica (Z) en dBZ<sup>41</sup> y precipitación:

$$Z = 10 \log 200R^{1,6}$$

Teniendo en cuenta que muchos algoritmos presentan la información solamente en dBZ, sería de utilidad estimar la intensidad de lluvia en mm/h.

$$Z = 10 \log 200R^{1,6}$$

$$Z = 10[\log 200 + \log R^{1,6}]$$

$$Z = 10[\log 200 + 1,6 \log R]$$

$$Z = 10 \log 200 + 16 \log R$$

$$Z - 10 \log 200 = 16 \log R$$

$$\frac{Z - 10 \log 200}{16} = \log R$$

$$10 \left( \frac{Z - 10 \log 200}{16} \right) = R$$

41 dBZ es la unidad logarítmica de la reflectividad.





Lo que permite, de esta manera, construir una tabla guía para interpretar el equivalente de 01, 1, 10, 100 mm/h en dBZ y, de forma inversa, conocer el equivalente de 10, 20, 30, 40, 50, 60 dBZ en mm/h.

R (mm/h)	0,1	0,2	0,6	1,0	3	10	12	49	100	205
z (1mm <sup>6</sup> /m <sup>3</sup> )	5	10	100	200	1 000	7 962	10 000	100 000	316 979	1 000 000
Z (dBZ)	7	10	20	23	30	39	40	50	55	60

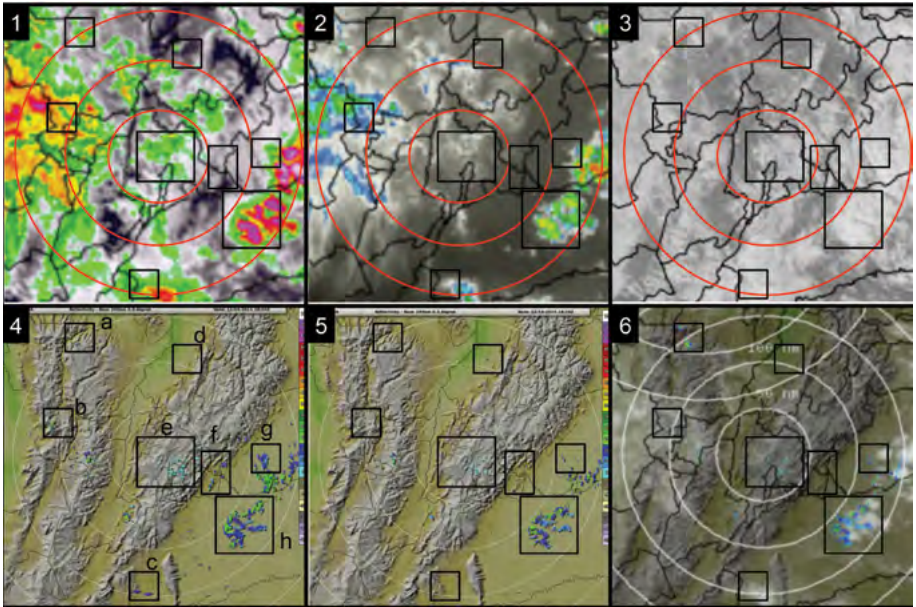
## 15.7 Interpretación de las imágenes radar

Para realizar un estudio de las nubes, precipitación y fenómenos que puedan afectar las aproximaciones de los aeródromos, siempre será necesario recurrir a la mayor cantidad de datos disponibles, siendo la información radar una herramienta fundamental para la toma de decisiones.

A continuación, se realiza un análisis básico de la información que puede ser obtenida usando imágenes satelitales, el indicador PPI y la gráfica de refracción estándar. la figura 118 reúne toda la información disponible dividida de la siguiente manera:

- Cuadrícula 1: Imagen satelital infrarroja. 14/NOV/15, 18:15 z
- Cuadrícula 2: Imagen satelital vapor de agua. 14/NOV/15, 18:15 z
- Cuadrícula 3: Imagen satelital visual. 14/NOV/15, 18:15 z
- Cuadrícula 4: PPI de 0° radar El Tablazo. 14/NOV/15, 18:25 z
- Cuadrícula 5: PPI de 0,5° radar El Tablazo. 14/NOV/15, 18:25 z
- Cuadrícula 6: Compuesto radares más IR. 14/NOV/15, 18:25 z





**Figura 118.** Identificación de tipo de nube y características usando imágenes satelitales y radar.  
**Fuente:** elaboración propia.

El producto compuesto está detectando más agua en el mismo sitio, esto se debe a que el radar de Corozal está interactuando en esa zona con el radar de El Tablazo, y el resultado final es calculado por un algoritmo que interactúa con los datos recibidos por los dos radares.

**Tabla 35.** Sector a.

Sector a			
	PPI de 0°	PPI de 0,5°	Imágenes satelitales
Distancia al radar:	145 Nm (268 km)	145 Nm (268 km)	Detecta TCU
Altura del haz:	4 km	6,5 km	Altura: 0 - > 15 000 ft
Elevación del radar:	3 544 m	3 544 m	
Altitud de detección:	7 544 m (24 740 ft)	10 044 m (32 972 ft)	
	Detecta agua	No detecta agua	
	Tormenta alcanza los 24 740 ft	Tormenta no supera los 32 972 ft	Tormenta en proceso de formación

**Fuente:** elaboración propia.



**Tabla 36.** Sector b.

Sector b			
	PPI de 0°: Detecta	PPI de 0,5°	Imágenes satelitales
Distancia al radar:	120 Nm (222 km)	120 Nm (222 km)	Detecta Cb
Altura del haz:	3 km	5 km	Altura: 0 – > 21 000 ft
Elevación del radar:	3 544 m	3 544 m	
Altitud de detección:	6 544 m (21 470 ft)	8 544 m (28 031 ft)	
	Detecta agua	No detecta agua	
	Tormenta alcanza los 21 470 ft	Tormenta no supera los 28 031 ft	Color y contornos en WV: Tormenta en proceso de disipación

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 37.** Sector c.

Sector c			
	PPI de 0°	PPI de 0,5°	Imágenes satelitales
Distancia al radar:	145 Nm (268 km)	145 Nm (268 km)	Detecta Cb
Altura del haz:	4 km	6,5 km	Altura: 0 – > 21 000 ft
Elevación del radar:	3 544 m	3 544 m	
Altitud de detección:	7 544 m (21 470 ft)	10 044 m (32 972 ft)	
	Detecta agua	No detecta agua	
	Tormenta alcanza los 24 740 ft, más intensa que sector a	Tormenta no supera los 32 972 ft	Color y contornos en WV: Fuerte desarrollo entre 2 y 6 km

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 38.** Sector d.

Sector d			
	PPI de 0°	PPI de 0,5°	Imágenes satelitales
Distancia al radar:	110 Nm (203 km)	110 Nm (203 km)	Detecta Sc
Altura del haz:	2,5 km	4,5 km	Altura: 0 – 6 000 ft
Elevación del radar:	3 544 m	3 544 m	
Altitud de detección:	6 044 m (19 829 ft)	8 044 m (26 391 ft)	
	Detecta agua	No detecta agua	
		Ruido, no es propicia la formación de agua	VIS, IR y WV permiten observar los Sc

Fuente: elaboración propia.



Tabla 39. Sector e.

Sector e			
	PPI de 0°	PPI de 0,5°	Imágenes satelitales
Distancia al radar:	70 Nm (130 km)	70 Nm (130 km)	Detecta Sc
Altura del haz:	1 km	2 km	Altura: 0 – 6 000 ft
Elevación del radar:	3 544 m	3 544 m	
Altitud de detección:	4544 m (14908 ft)	5 544 m (18 189 ft)	
	Detecta agua	No detecta agua	
	Pequeñas tormentas en formación	Tormenta no supera los 18 189 ft	VIS e IR permiten observar los Sc

Fuente: elaboración propia.

Tabla 40. Sector f.

Sector f			
	PPI de 0°	PPI de 0,5°	Imágenes satelitales
Distancia al radar:	120 Nm (222 km)	120 Nm (222 km)	Detecta Cb hacia el Este
Altura del haz:	3 km	5 km	Altura: 0 – 12 000 ft
Elevación del radar:	3 544 m	3 544 m	
Altitud de detección:	6 544 m (21 470 ft)	8 544 m (28 031 ft)	
	Detecta agua	Señal débil	
	Tormenta fuerte	Tormenta inferior a 28 031 ft	IR fuerte presencia de Sc, y desarrollo vertical hacia el Este

Fuente: elaboración propia.

Tabla 41. Sector g.

Sector g			
	PPI de 0°	PPI de 0,5°	Imágenes satelitales
Distancia al radar:	120 Nm (222 km)	120 Nm (222 km)	Detecta Cb
Altura del haz:	3 km	5 km	Altura: 0 – > 40 000 ft
Elevación del radar:	3 544 m	3 544 m	
Altitud de detección:	6 544 m (21 470 ft)	8 544 m (28 031 ft)	
	Detecta agua	No detecta agua	
	Tormenta fuerte	Tormenta fuerte superior a 28 031 ft	Fuerte señal en todas las imágenes

Fuente: elaboración propia.





# **Apéndice 1**

Accidentes aéreos –  
meteorología factor  
contribuyente

---

222

La siguiente información recopila los incidentes/accidentes aéreos en los que la meteorología se consideró un factor contribuyente. Se han clasificado a partir de la base de incidentes y accidentes aéreos que fueron analizados por la Inspección General de la Fuerza Aérea Colombiana en el periodo 1985–2013.

Baja visibilidad		
Aeronave	Fecha	Punto del incidente / accidente
F-28 FAC 1140	28-mar-85	Cerro Montañitas (Caquetá)
PC-6 FAC 1110	09-jul-86	Pista Santa Ramos (Caquetá)
C- 402 FAC 5530	26-sep-87	Cerro Filo Azul (Tame – Arauca)
PC-6 FAC 1112	24-jun-93	Cerro Rojo 3MN Pista Taraira (Vaupés)
C-212 FAC1152	09-sep-95	Cerro La Cachivera-La Macarena
UH-60 FAC 4109	06-may-96	Mapiripán (Guaviare)
A-37 FAC 2167	29-dic-96	Vereda Alto Bonito, cañón de La Llorona, Dabeiba (Antioquia)
AC 47T FAC 1659	02-sep-00	Cerro de Tatama-Montezuma (Risaralda, Chocó, Valle del Cauca)
C-212 FAC 1251	04-dic-00	2,5 MN Pista SKTQ (Caquetá)
UH-60 FAC 4101	14-jun-04	Área El Billar (Caquetá)
UH60L FAC 4132	10-jul-05	Cancha vereda Vijagual (Antioquia)
C-208 FAC 5054	22-nov-06	Radial 122 VOR Girardot 11,8 millas
HUEY-II FAC 4437	01-may-07	Vereda Campo Llano, municipio San Vicente del Caguán, N02,00,01 ; W74,35,22 (Caquetá)
SA2-37 FAC 5753	24-mar-08	Base Militar Villa Garzón (Putumayo)
SA2-37 FAC 5753	21-ago-09	SKTQ (Caquetá)
HK 4536, Satena	05-may-10	Aeropuerto Fabián León Bentley (Mitú - Vaupés)
Escuadrón KFIR	20-jul-13	Pista SKAP (Villavicencio)

Turbulencia		
Aeronave	Fecha	Punto del incidente / accidente
B-212 FAC 2170	19-dic-86	Estación El Cisne – Nevado del Ruiz (Tolima)
B-212 FAC 4221	28-abr-88	Cerro Pan de Azúcar (Antioquia)
UH-60 FAC 4107	12-feb-93	Páramo Sumapaz (Cundinamarca)
UH-1H FAC-4418	26-jul-93	Cerro La María (Tolima)
UH-1H FAC-4414	28-oct-94	Vereda Arenales (Yopal)
B-212 FAC4008	30-jun-99	Cerro La María (Tolima)
G358 FAC 5063	18-ene-05	Barrancominas (Guainía)
H530 FAC 4302	27-dic-05	Base Aérea CATAM (Bogotá)



Turbulencia		
Aeronave	Fecha	Punto del incidente / accidente
T-41 FAC 2418	03-abr-08	Pista SKGB (Cali)
AC-47T FAC 1658	08-sep-08	PISTA SKTQ (Caquetá)
ART FAC 6020	06-sep-12	Saravena (Arauca)
K-350 FAC 5078	14-sep-12	Pista SKPP (Cauca)
B-212 FAC 4003	20-sep-12	SKME (Tolima)
HUEY II FAC 4522	26-sep-12	SKGB (Cali)
ART FAC 6034	27-oct-12	Municipio de Convención (Santander)

Impacto con rayo		
Aeronave	Fecha	Punto del incidente / accidente
A-37 FAC 2177	10-nov-04	Punto ISOTO - SKBQ
A-37 FAC 2180	08-ago-07	SKBQ
SR-26 FAC 5741	22-nov-08	Radial 241° - 20 DME Cali 14000 ft
SR-560 FAC 5764	20-oct-09	Montería (Córdoba)
DO-328 FAC 1160	18-feb-11	Florencia (Caquetá)
E-170 FAC 1180	13-abr-11	Área SKRG (Antioquia)
C-295 FAC 1281	13-jun-11	Ruta SKRG - SKBO
T/C FAC 5553	17-nov-11	Área SKUA (Vichada)
C-130 FAC 1004	11-dic-11	Ruta SKAP - SKNA
A-29 FAC 3106	20-abr-12	Población Puerto López (Meta)
ATR-42 FAC 1184	05-may-12	Radial 150 MRN 15 MN a 18000 ft
DO-328 FAC 1160	17-sep-13	SKUI (Quibdó, Choco)
ERJ-145 FAC 1171	27-oct-13	Área SKLM (La Guajira)

Engelamiento		
Aeronave	Fecha	Punto del incidente / accidente
AC 47 FAC1650	30-ago-88	Intersección ANAME (Cundinamarca)
A-37B FAC 2169	06-may-92	Ruta SKBQ - SKRG
A-29 FAC 3115	2004	Intersección ANAME (Cundinamarca)
SR-560 FAC 5763	15-jul-08	Los Cedros (Antioquia)
K-350 FAC 5747	8-sep-10	Intersección ANAME (Cundinamarca)
C-235 FAC 1261	31-jul-15	Las Palomas (Cesar)

Impacto con hielo		
Aeronave	Fecha	Punto del incidente / accidente
T-27 FAC 2256	16-oct-04	El Paso en ruta SKAP - SKAR
D-328 FAC 1160	14-may-04	Ruta SKAS - SKCL
T-37B FAC 2127	26-sep-12	Ruta SKAP - SKPQ



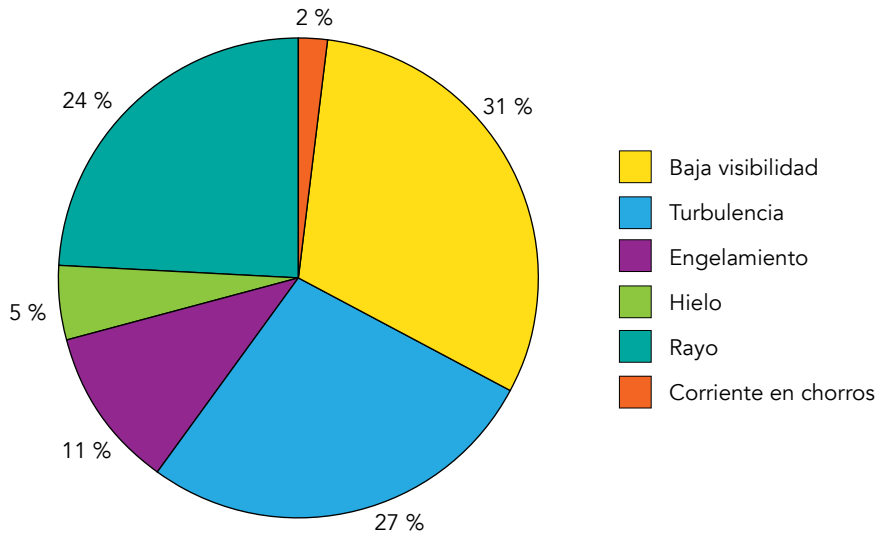


Corriente en Chorro ( <i>jet stream</i> )		
Aeronave	Fecha	Punto del incidente / accidente
C-130 FAC 1003	16-oct-82	Océano Atlántico

224

Esta información ha permitido conocer cómo han afectado los peligros meteorológicos a las aeronaves de la Fuerza Aérea Colombiana y dónde deben enfocarse los esfuerzos con el fin de prevenir futuros incidentes/accidentes aéreos. El porcentaje de afectación que cada uno de estos peligros ha causado sobre las aeronaves FAC se resume en la figura 119.

### ACCIDENTES AÉREOS EN LA FAC RELACIONADOS CON METEREOLÓGÍA



**Figura 119.** Porcentaje de afectación a las aeronaves FAC según el tipo de peligro meteorológico en el periodo 1985–2013.

**Fuente:** *elaboración propia*



# **Glosario de siglas y acrónimos**

---

226	<b>A</b>	<p>AD BLW MNM MET Aerodrome Below Minimum Meteorological</p> <p>AD OPER IMC Aerodrome Operation in Instrumental Meteorological Conditions</p> <p>AGL Above Ground Level (Sobre el nivel del suelo)</p> <p>AIREP Air Report</p> <p>ALA Approach and Landing Accident (Accidente en la aproximación y aterrizaje)</p> <p>APCLM Airport Closed Meteorology (Aeropuerto cerrado por meteorología)</p> <p>APCLO Airport Closed Operation</p> <p>APRSM Airport Restricted Meteorology</p> <p>ARP Airport Reference Point (Punto de referencia de aeródromo)</p> <p>ARP Aeronotificación</p> <p>ARS Aeronotificación especial</p> <p>ASFC Above Surface</p> <p>ATIS Automatic Terminal Information Service (Servicio automático de información terminal)</p> <p>ATS Servicio de tránsito aéreo</p> <p>AWOS Automated Weather Observing System</p>	<b>E</b>	<p>EMA Estación Meteorológica Automática</p>
	<b>B</b>	<p>BFI Backup Flight Instrument</p>	<b>F</b>	<p>FAA Federal Aviation Administration</p> <p>FAC Fuerza Aérea Colombiana</p> <p>FL Flight Level</p>
	<b>C</b>	<p>CACOM Comando Aéreo de Combate</p> <p>CAMAN Comando Aéreo de Mantenimiento</p> <p>CAT Clear Air Turbulence (Turbulencia en aire claro)</p> <p>CAVOK Ceiling And Visibility OK</p> <p>CFIT Controlled Flight Into Terrain</p> <p>CGS Sistema Cegesimal de Unidades</p> <p>COFAC Comando de la Fuerza Aérea</p>	<b>G</b>	<p>GAORI Grupo Aéreo del Oriente</p> <p>GHRC Global Hydrology Resource</p> <p>GOES Geostationary Operational Environmental Satellite</p>
			<b>H</b>	<p>HIMAT Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras</p> <p>HF High Frequency</p> <p>HWS Horizontal Windshear (Cizalladura horizontal)</p>
			<b>I</b>	<p>IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales</p> <p>IDIGER Instituto Distrital de Gestión del Riesgos y Cambio Climático</p>
			<b>J</b>	<p>IF Reglas de vuelo por instrumentos</p> <p>IMC Condiciones meteorológicas de vuelo por instrumento</p> <p>IRIS Interactive Radar Information System</p> <p>ISA International Standard Atmosphere (Atmósfera estándar internacional)</p> <p>JPS Joint Polar Satellite System</p>
			<b>L</b>	<p>LIS Lightning Imaging Sensor</p> <p>LLWAS Low Level Windshear Alert System</p>



<b>M</b>				
MEA	Minimum Enroute Altitude (Altitud mínima en ruta)	SKCC	Aeródromo de Cúcuta	
METAR	Informe meteorológico ordinario de aeródromo	SKCL	Aeródromo de Cali	
MDC	Departamento Meteorológico de Curazao	SKCG	Aeródromo de Cartagena	
		SKCO	Aeródromo de Tumaco	
		SKCZ	Aeródromo de Corozal	
		SKEJ	Aeródromo de Barrancabermeja	
		SKFL	Aeródromo de Florencia	
<b>N</b>		SKGB	Aeródromo de Guabito	227
NDC	No Detected Clouds	SKGI	Aeródromo de Girardot	
NHC	National Hurricane Center (Centro Nacional de Huracanes)	SKGO	Aeródromo de Cartago	
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	SKGP	Aeródromo de Guapí	
NOSIG	No Significant change (Sin ningún cambio importante)	SKGY	Aeródromo de Guaymaral	
NSC	No Significant Clouds	SKIB	Aeródromo de Ibagué	
		SKIP	Aeródromo de Ipiales	
		SKLC	Aeródromo de Los Cedros	
		SKLR	Aeródromo de Lareandia	
		SKLT	Aeródromo de Leticia	
<b>O</b>		SKMA	Aeródromo de Madrid	
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional	SKMD	Aeródromo de Medellín	
		SKME	Aeródromo de Melgar	
		SKMR	Aeródromo de Montería	
		SKMU	Aeródromo de Mitú	
<b>P</b>		SKMZ	Aeródromo de Manizales	
PPI	Plan Position Indicator (Indicador horizontal)	SKNA	Aeródromo de La Macarena	
PRF	Pulse Repetition Frequency	SKNV	Aeródromo de Neiva	
		SKOC	Aeródromo de Ocaña	
		SKPC	Aeródromo de Puerto Carreño	
<b>R</b>		SKPE	Aeródromo de Pereira	
RAC	Reglamento Aeronáutico Colombiano	SKPP	Aeródromo de Popayán	
RHI	Range Height Indicator (Indicador vertical)	SKPQ	Aeródromo de Palanquero	
RPM	Revoluciones por minuto	SKPS	Aeródromo de Pasto	
RVR	Runway Visual Range	SKPV	Aeródromo de Providencia	
		SKQU	Aeródromo de Mariquita	
		SKRH	Aeródromo de Riohacha	
		SKRG	Aeródromo de Rionegro	
<b>S</b>		SKSA	Aeródromo de Saravena	
SCMH	Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología	SKSJ	Aeródromo de San José del Guaviare	
SIATA	Sistema de Alertas Tempranas del Valle de Aburrá	SKSM	Aeródromo de Santa Marta	
SIGWX	Significant Weather	SKSP	Aeródromo de San Andrés y Prov.	
SIMFAC	Sistema Meteorológico de la FAC	SKSV	Aeródromo de San Vicente del Caguán	
SKAP	Aeródromo de Apiay	SKTI	Aeródromo de Tolemaida	
SKAR	Aeródromo Armenia	SKTM	Aeródromo de Tame	
SKAS	Aeródromo de Puerto Asís	SKTQ	Aeródromo de Tres Esquinas	
SKBG	Aeródromo de Bucaramanga	SKUA	Aeródromo de Marandúa	
SKBO	Aeródromo de Bogotá	SKUC	Aeródromo de Arauca	
SKBQ	Aeródromo de Barranquilla	SKUI	Aeródromo de Quibdó	
SKBS	Aeródromo de Bahía Solano	SKVP	Aeródromo de Valledupar	
SKBU	Aeródromo de Buenaventura	SKVV	Aeródromo de Villavicencio	
		SKYP	Aeródromo de Yopal	

	SPECI	Aerodrome Special meteorological report	<b>V</b>	
	SS	Tormenta de polvo o arena	VA	Actividad volcánica previa a la erupción o erupción volcánica
	<b>T</b>		VA CLD	Nube de ceniza volcánica
	TA	Altitud de transición	VFR	Reglas de vuelo visual
228	TACMET	Tactical Meteorological Observation System	VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
	TL	Nivel de transición	VMC	Condiciones meteorológicas visuales
	TS	Tormenta sin granizo	VWS	Vertical Windshear (Cizalladura Vertical)
	TSGR	Tormenta con granizo		
	<b>U</b>		<b>W</b>	
	UAEAC	Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil	WMO	World Meteorological Organization (Organización Meteorológica Mundial)
	UCAR	University Corporation for Atmospheric Research	WRF	Weather Research and Forecasting
	UTC	Universal Time Coordinated	<b>Z</b>	
			ZCIT	Zona de Confluencia Intertropical



# Referencias

---

- Aguilar, A. y León G (2004). Aproximación a un modelo de pronóstico de niebla de radiación en Rionegro Antioquia. *Meteorol. Colomb.* 8, 89-97.
- American Meteorological Society (s.f.a). Turbulence. *Meteorology Glossary*. Recuperado de <http://glossary.ametsoc.org/wiki/Turbulence>
- American Meteorological Society (s.f.b). Aircraft turbulence. *Meteorology Glossary*. Recuperado de [http://glossary.ametsoc.org/wiki/Aircraft\\_turbulence](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Aircraft_turbulence)
- American Meteorological Society (s.f.c). Real time. *Meteorology Glossary*. Recuperado de [http://glossary.ametsoc.org/wiki/Real\\_time](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Real_time)
- American Meteorological Society (s.f.d). Visibility. *Meteorology Glossary*. Recuperado de <http://glossary.ametsoc.org/wiki/Visibility>
- American Meteorological Society (s.f.e). Oblique visibility. *Meteorology Glossary*. Recuperado de [http://glossary.ametsoc.org/wiki/Oblique\\_visibility](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Oblique_visibility)
- Barrero, D. (1997). *Ala Perdida*. Bogotá: Barrero David.
- Collier, CG. (1996). *Applications of Weather Radar Systems. A guide to uses of radar data in meteorology and hydrology*. Wiley
- Earth Observatory (2017). *Lightning Frequency*. [Mapa]. Recuperado de <https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=2002>
- E-educativa CATEDU. (2016). Circulación general de la atmósfera [Figura]. Recuperada de [http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2556/html/5\\_circulacion\\_general\\_de\\_la\\_atmosfera.html](http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2556/html/5_circulacion_general_de_la_atmosfera.html)
- Eichenberger, W. (1996). *Meteorología para aviadores. Curso para piloto, navegantes y técnicos de explotación* (5ta. Edición). Madrid: Paraninfo.
- Eslava, J. (1994). Acerca de la distribución espacio-temporal de la precipitación en la región del Pacífico colombiano. *Atmósfera*. 22, 71–80.
- Eslava, J. (1992). Perfil altitudinal de la temperatura del aire en Colombia. *Geofís. Colomb.* 1, 37-52.
- FAA. (s.f.). *Structural Icing Type*. Recuperado de [https://www.faasafety.gov/gslac/ALC/course\\_content.aspx?clD=33&slD=152&preview=true](https://www.faasafety.gov/gslac/ALC/course_content.aspx?clD=33&slD=152&preview=true)
- FAA. (1988). *Advisory Circular. Pilot WindShear Guide*. Recuperado de [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC00-54.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC00-54.pdf)
- FAA. (2000). *Advisory Circular. Chapter 10, Icing*. Recuperado de [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC%2000-6A%20Chap%2010-12.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC%2000-6A%20Chap%2010-12.pdf)
- FAA. (2007). *Advisory Circular. Preventing Injuries Caused by Turbulence*. Recuperado de [http://rgl.faa.gov/Regulatory\\_and\\_Guidance\\_Library/rgAdvisoryCircular.nsf/0/ec449bf3dccc392a-2862573fa0051dcae/\\$FILE/AC%20120-88%20CHG%201.pdf](http://rgl.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgAdvisoryCircular.nsf/0/ec449bf3dccc392a-2862573fa0051dcae/$FILE/AC%20120-88%20CHG%201.pdf)
- FAA. (2008). *WindShear*. Recuperado de <https://www.faasafety.gov/files/gslac/library/documents/2011/Aug/56407/FAA%20P-8740-40%20WindShear%5Bhi-res%5D%20branded.pdf>
- FAA. (2015). *Pilot Guide: Flight in Icing Conditions*. Recuperado de [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC\\_91-74B.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_91-74B.pdf)
- Fuerza Aérea Colombiana. (1989). *Manual de investigación de accidentes de la FAC*. Bogotá: Autor.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2010). *Alerta de seguridad N°.17, IGEFA-DISOP-86.10*, 23. Bogotá: Autor.
- Howard, L. (1803). On the modifications of clouds, and on the principles of their production, suspension, and destruction; being the substance of an essay read before the Askesian Society in the session 1802–3. *The Philosophical Magazine*. 16(22). Recuperado de: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/14786440308676310>
- OACI (2009). *Indicadores de lugar*. Doc 7910. Edition 132. Montréal: Autor.
- OACI (2011). *Manual or Aeronautical Meteorological Practice*. Montréal: Autor.
- OACI (2016). *Abbreviations and Codes*. Doc 8400. Montréal: Autor.



- IDEAM. (2005). Distribución espacio-temporal de las variables del clima. *Atlas Climatológico de Colombia*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- IDEAM y DAMA (2001). *Estabilidad atmosférica y altura de la capa de mezcla*. Recuperado de: <http://slideplayer.es/slide/5409923/>
- IDEAM (s.f.). *Estudio de la caracterización climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelito*. Bogotá. IDEAM. Recuperado de: <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/estudio-de-la-caracterizacion-climatica-de-bogota-y-cuenca-alta-del-rio-tunjuelito>
- IGEFA (2012). Documento institucional. Bogotá: Fuerza Aérea Colombiana
- Inzunza, J (2006). *Meteorología Descriptiva*. Chile: Departamento de Física de La Atmósfera. Universidad de Concepción.
- JetPlan (s.f.). *Cartas Aeronáuticas*. Recuperado de <https://www.jetplan.com/>
- Jimenez, J. y J. Zea. (2005). Caracterización de la bruma, llovizna y lluvia como fenómenos meteorológicos adversos a la operación bajo reglas de vuelo visual (VFR) en el aeródromo "Germán Olano". *Revista Meteorología Colombiana*, (9), 15-22.
- Ledesma, M. y Baleriola, G. (1993). *Meteorología aplicada a la aviación*. Madrid: Paraninfo.
- León, G., J. Zea y J. Eslava (2000). Circulación general del trópico y la zona de confluencia intertropical en Colombia. *Meteorología Colombiana*. 1, 31-38.
- López, J. (2012). *Módulo 17, Hélices*. Madrid: Paraninfo.
- Marshall, J. S., Langille, R. C., y Palmer, W. M. K. (1947). Measurement of Rainfall by Radar. *Journal of Meteorology*, 4(6), 186-192. Recuperado de: [http://doi.org/10.1175/1520-0469\(1947\)004<0186:-MORBR>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0469(1947)004<0186:-MORBR>2.0.CO;2)
- MetEd. (2014). *Vientos canalizados*. Recuperado de: [https://www.meted.ucar.edu/meso-prim/gapwinds\\_es/navmenu.php?tab=1&page=4-1-1&type=flash](https://www.meted.ucar.edu/meso-prim/gapwinds_es/navmenu.php?tab=1&page=4-1-1&type=flash)
- MetEd. (2016). *Weather radar Fundamentals*. Imagen Radar de doble polarización. Recuperado de [http://meted.ucar.edu/index\\_es.php](http://meted.ucar.edu/index_es.php)
- MetEd. (2015). *Detección de turbulencia en aire claro sobre Sudáfrica*. Recuperado de [https://www.meted.ucar.edu/asmet/s\\_africa\\_a7\\_es/navmenu.php?tab=1&page=2.5.0](https://www.meted.ucar.edu/asmet/s_africa_a7_es/navmenu.php?tab=1&page=2.5.0) y [http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/skewt\\_es/turb\\_intro2.htm](http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/skewt_es/turb_intro2.htm)
- Moreno C. y Gilaguinaliu A. (1999). *Análisis de la sinistralidad aérea por causa meteorológica (1970-1999)*. España: Universidad de Alicante. Recuperado de: <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/409686.pdf>
- Moreno y Gil (2003). *Análisis de la sinistralidad aérea por causa meteorológica (1970-1999)*. Alicante: Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante.
- NOAA (s.f.). *Geostationary Operational Environmental Satellite – R series*. Recuperado de <http://www.goes-r.gov/spacesegment/ABI-tech-summary.html> y <http://www.goes-r.gov/education/ABI-bands-quick-info.html>
- NOAA. (2013). *Tropical Cyclones*. Recuperado de <http://www.nws.noaa.gov/os/hurricane/resources/TropicalCyclones11.pdf>
- NOAA (s.f.a). *Hurricane Research Division. How do tropical cyclones form?*. Recuperado de <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A15.html>
- NOAA (s.f.b). *National Hurricane Center*. Recuperado el 20 de septiembre de 2016 de <http://www.nhc.noaa.gov/>
- NOAA (s.f.c). *Weather prediction Center. Caribbean. Sfc west. Surface analysis*. Recuperado el 29 de noviembre de 2017 de: <http://www.wpc.ncep.noaa.gov/mike/samapindex3.php>
- NOAA (s.f.d). *Weather prediction Center. Station plot*. Recuperado el 29 de noviembre de <http://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/stationplot.shtml>
- OACI (2007). *Meteorological Service for International Air Navigation. Sixteenth Edition Anexo 3. Appendix 2. Technical specifications related to world area forecast system and meteorological offices. World area forecast system*. Canada: Montréal. OACI.
- Politovich, M. (1989). Aircraft icing caused by large supercooled droplets. *J. Appl. Meteor.*, **28**, 856-868. Recuperado de [ftp://ftp.sigmet.com/outgoing/manuals/RVP900\\_Users\\_Manual.pdf](ftp://ftp.sigmet.com/outgoing/manuals/RVP900_Users_Manual.pdf)
- RAE (2014). *Diccionario de la lengua española (23ª.ed.)*. Consultado en <http://www.rae.es/rae.html>



- Rinehart R. (2007). *El Radar*. Columbia: Rinehart publications.
- Rosengaus, M. (1999). Sobre el error en la estimación de lluvia utilizando radar meteorológico. *Ingeniería del Agua*, 6(2), p. 186.
- Rosengaus, M (1995). Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos clásicos. Primera parte. *Ingeniería Hidráulica en México*, 10(1), p. 58.
- Ruiz, J. y J. Pabón. (2002). Propuesta de un modelo estacionario de diagnóstico de dispersión de contaminantes químicamente no reactivo aplicada para fuentes móviles en Bogotá. *Meteorol. Colomb*, 6, 131-138.
- SIMFAC (s.f.). *Sistema de información meteorológica de la FAC*. Recuperado de [www.simfac.mil.co](http://www.simfac.mil.co)
- Stull, R., (2016), *Practical Meteorology: An algebra-based survey of Atmospheric Science*. Vancouver, Canada: University of British Columbia.
- Tejada y Gómez (2015). *Prontuario Solar de México*. Colima: Universidad Veracruzana. Recuperado de [http://www.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Prontuario-solar-de-Mexico-\(noviembre-de-2015\)\\_6.pdf](http://www.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Prontuario-solar-de-Mexico-(noviembre-de-2015)_6.pdf)
- Torres, H. (s.f.). Programa de Investigación sobre adquisición y análisis de señales: PAAS-UN, en la VII Jornada Electrónica. II Taller de EMC del CEC. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., y Kiehl, J. (2009). Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3), 311-323, doi: 10.1175/2008BAMS2634.1
- UAEAC (s.f.). *Meteorología aeronáutica*. Recuperado de <http://meteorologia.aerocivil.gov.co>
- UAEAC (2005). *Ascensos y descensos en VMC cuidando propia separación*. Recuperado de [http://www.aerocivil.gov.co/servicios-a-la-navegacion/servicio-de-informacion-aeronautica-ais/Documents/AIC\\_C04\\_2005.pdf](http://www.aerocivil.gov.co/servicios-a-la-navegacion/servicio-de-informacion-aeronautica-ais/Documents/AIC_C04_2005.pdf)
- UAEAC (2006). *Reglamento Aeronáutico Colombiano. Meteorología Aeronáutica*. Recuperado de: <http://www.aerocivil.gov.co/normatividad/RAC/RAC%20%2012%20-%20Meteorolog%C3%A1Da%20%20Aeron%C3%A1utica.pdf>
- UAEAC (2012). Circular Técnica Reglamentaria 047. Procedimientos de estandarización de los Reportes de Meteorología Aeronáutica UAEAC – DEAM, versión 2. Recuperado de <http://www.aerocivil.gov.co/normatividad/CIRCULARRES%20MET/CI%20047%20-%20V2.pdf>
- UAEAC (2014). ENR 1.2 - Reglas de vuelo visual. *Publicación de Información Aeronáutica*. Recuperado de <http://www.aerocivil.gov.co/servicios-a-la-navegacion/servicio-de-informacion-aeronautica-ais/Documents/03%20ENR%201.2.pdf>
- UAEAC (2016). Mantenimiento de Aeronaves, RAC 43. *Reglamentos Aeronáuticos de Colombia*. Recuperado de: <http://www.aerocivil.gov.co/normatividad/RAC/RAC%20%2012%20-%20Mantenimiento.pdf>
- UK Met. Office. (1994). *Handbook of Aviation Meteorology*. London: HMSO.
- Vaisala. (2013). *User's Guide AVIMET Automated Weather Observing System*. Helsinki: Vaisala Oyj.
- Vaisala. (2017). *User's Guide RVP900, Digital Receiver and Signal Processor*. Recuperado de [ftp://ftp.sigmet.com/outgoing/manuals/RVP900\\_Users\\_Manual.pdf](ftp://ftp.sigmet.com/outgoing/manuals/RVP900_Users_Manual.pdf)
- WAFAC WASHINGTON (s.f.) *Aviation Weather Center. NOAA National Weather Service*. Recuperado el 26 de septiembre de 2011 de <http://aviationweather.gov/progchart?gis=off>
- Wallace, J. M. y Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey* (Vol. 92). Canada. Elsevier. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=HZ2wNtDOU0oC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- WMO. (1982). *Informe final abreviado de la octava reunión de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación, OMM – N° 590*. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial.
- WMO (s.f.). *Cloud Classification Summary*. Recuperado de <https://cloudatlas.wmo.int/cloud-classification-summary.html>.
- WMO (2011). *Manual on Codes. International Codes*. Recuperado de [http://www.wmo.int/pages/prog/www/WMOcodes/WMO306\\_v11/Publications/2016update/WMO306\\_v11\\_en\\_2011UP2016.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/www/WMOcodes/WMO306_v11/Publications/2016update/WMO306_v11_en_2011UP2016.pdf)
- WMO (s.f.). *International Meteorological Vocabulary*. Recuperado de [https://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteo\\_term\\_wmo\\_en.html](https://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteo_term_wmo_en.html)





**Suscripciones o canjes, diríjase a:**

**Ciencia y Poder Aéreo / Science and Air Power**  
 Correos electrónicos / E-mails  
 cienciaypoderaereo@gmail.com  
 cienciaypoderaereo@epfac.edu.co

**Biblioteca Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana**  
 Correo electrónico / E-mail  
 biblioteca@epfac.edu.co

**Para mayores informes**

**Dirección postal / Mailing Address**  
 Cra. 11 No. 102-50 Edificio ESDEGUE.  
 Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana  
 Departamento de Investigación.  
 Oficina 411. A.A. 110111  
 Teléfonos (057-1) 637 8927 – 6206518  
 Ext. 1700, 1719, 1722.  
 Bogotá D.C., Colombia (Suramérica)

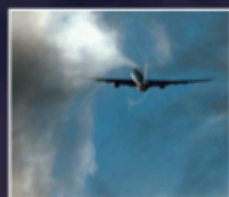
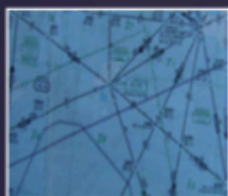
Sitio web (versión electrónica) / Website (Electronic Version)  
<https://libros.publicacionesfac.com>







La obra representa la aplicabilidad de los conceptos básicos de meteorología en la aeronáutica. Está enfocada en los peligros meteorológicos y la forma como estos han venido afectando la seguridad de las operaciones aéreas dentro de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC). Se visualiza como un instrumento útil para pilotos, controladores aéreos y personal relacionado con el mundo aeronáutico, tendiente a brindar los conocimientos suficientes para reconocer fenómenos meteorológicos adversos y la toma de decisiones acertadas en el planeamiento, desarrollo y ejecución de las operaciones aéreas.



#### **Richard Humberto Cáceres León**

Mayor de la Fuerza Aérea Colombiana, administrador aeronáutico, magister en meteorología de la Universidad Nacional de Colombia y candidato a PhD en meteorología de la Universidad de Barcelona. Experiencia en docencia, investigación, pronóstico del tiempo, meteorología aeronáutica, modelación atmosférica y radares meteorológicos.



COLECCIÓN  
**C&PA**

ISBN: 978-958-59961-1-3  
E-ISBN 978-958-59961-0-6

