



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**DISEÑO A ESCALA DE UN ESPACIO EXPERIMENTAL PARA PRODUCIR LAS
CONDICIONES MÍNIMAS EN DONDE SE EXPERIMENTE LA FORMACIÓN DE**

NUBES

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

CLAUDIA RUTH SORIANO RAMÍREZ



MÉXICO, D.F. 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: REYNALDO SANDOVAL GONZALES

VOCAL: BENJAMIN RUIZ LOYOLA

SECRETARIO: SUSANA DIANA PERALTA MIRANDA

1er. SUPLENTE: LETICIA VALLE ARIZMENDI

2° SUPLENTE: LUZ MARIA NAVA FERNANDEZ

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: ANTIGUA ESCUELA DE ARTES PLÁSTICAS
DEL INBA, EX ESMERALDA**

ASESOR DEL TEMA:

I.Q. SUSANA DIANA PERALTA MIRANDA.

SUSTENTANTE (S):

CLAUDIA RUTH SORIANO RAMÍREZ

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	7
1. ¿POR QUÉ UNA CÁMARA PARA FORMAR NUBES?	10
1.1 Antecedentes	11
1.2 Objetivo	16
1.3 Metodología del Trabajo	16
2. LA TEORÍA DE LAS NUBES	19
2.1 Atmósfera	20
2.2 ¿Hidrometeoro o nube?	24
2.2.1 Hidrometeoros.....	24
2.2.2 Litometeoros	24
2.2.3 Fotometeoros.....	25
2.2.4 Electrometeoros.....	25
2.3 ¿Qué es una nube?	25
2.3.1 ¿Cómo se forman?	26
2.3.2 Clasificación.....	38
2.3.3 Datos curiosos	47
3. DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN DE LA CÁMARA DE NIEBLA.....	48
3.1 Pruebas en laboratorio	49
3.2 Análisis del sistema.....	51
3.3 Diseño de la cámara a escala.....	52
3.4 Diagramas del Escala.....	55
3.4.1 Diagrama de Flujo del proceso.....	55
3.4.2 Diagrama de Tubería e Instrumentación del proceso.....	56
3.4.3 Diseño de integración visual de la escala	57
4. FORMANDO UNA NUBE	58
4.1 Pruebas en la escala de la cámara	59
4.1.1 Preparación de la escala para su uso	60
4.2 Datos Experimentales.....	61

5. CALCULANDO UNA NUBE	75
5.1 Casos de Estudio	76
5.1.1 Nube 1	76
5.1.2 Nube 2	85
5.2 Nubes Formadas.....	90
CONCLUSIONES	95
REFERENCIAS.....	98
ANEXO I DEFINICIONES DE NUBES	100
ANEXO II LA ESCALA Y SUS EQUIPOS.....	107
ANEXO III FOTOS DE LAS PRUEBAS EN LA ESCALA	111
ANEXO IV GLOSARIO	114

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Nimbus Probe 2010 (Gamero, 2015)	12
Ilustración 2 Nimbus Platform (Gamero, 2015)	12
Ilustración 3 Nimbus Minerva 2012 (Gamero, 2015).....	13
Ilustración 4 Nimbus II 2012 (Gamero, 2015).....	13
Ilustración 5 Fotografía del estadio en Qatar con la nube artificial. (Javier, 2015)	14
Ilustración 6 Capas de la Atmósfera (Anónimo).....	23
Ilustración 7 Cambio de Fase del agua	26
Ilustración 8 Fuentes de aerosoles (Renom)	29
Ilustración 9 Distribución de Hielo y Agua en una nube Cumulonimbus (Renom) .	32
Ilustración 10 Proceso de Bergeron	33
Ilustración 11 Cristales de hielo por Acreción.	34
Ilustración 12 Copo de nieve formado por Agregación.....	34
Ilustración 13 Cirrocumulos	41
Ilustración 14 Altocumulus	41
Ilustración 15 Altostratus	41
Ilustración 16 Stratus	42
Ilustración 17 Cumulonimbus	42
Ilustración 18 Formas típicas de nubes	43
Ilustración 19 Nubes Noctulicentes desde Estocolmo, (Rosén, 2015).....	45
Ilustración 20 Diagrama de la prueba.	49
Ilustración 21 Pruebas de laboratorio	50
Ilustración 22 DTI Nitrógeno	52
Ilustración 23 DTI Vapor de Agua	53
Ilustración 24 DTI Aire	54
Ilustración 25 DFP del proceso.....	55
Ilustración 26 DTI del proceso.	56
Ilustración 27 DTI del proceso, vista superior.	56
Ilustración 28 Integración visual de la escala	57

Ilustración 29 Nube en el Escala	60
Ilustración 30 Diagrama de flujo de proceso.	80
Ilustración 31 DFP	84
Ilustración 32 Nube 1	85
Ilustración 33 DFP	88
Ilustración 34 Nube 2	89
Ilustración 35 Stratocumulus 1	90
Ilustración 36 Stratocumulus 2	90
Ilustración 37 Stratocumulus 3	91
Ilustración 38 Stratocumulus 4	91
Ilustración 39 Stratus 1	92
Ilustración 40 Stratus 2.....	92
Ilustración 41 Stratus 3.....	93
Ilustración 42 Stratus	93
Ilustración 43 Zoom a la estructura de una nube.....	96
Ilustración 44 Nube formada sin Núcleos de Condensación	97
Ilustración 45 La escala y sus equipos	107
Ilustración 46 La escala de frente.....	107
Ilustración 47 La escala de perfil	108
Ilustración 48 Compresor	108
Ilustración 49 Tanque de Nitro	109
Ilustración 50 Tanque de nitro.....	109
Ilustración 51 Hervidor.....	110
Ilustración 52 Mangueras.....	110
Ilustración 53 Preparación del Nitrógeno.	111
Ilustración 54 Cámara saturada de vapor	111
Ilustración 55 Cámara saturada a la mitad de vapor.....	112
Ilustración 56 Reconexión de mangueras	112
Ilustración 57 Algunas gotas cayendo	112
Ilustración 58 Choque del nitrógeno y del vapor de agua	113
Ilustración 59 Formación de una nube.	113

Ilustración 60 Líneas..... 113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición del aire seco a nivel del mar.	21
Tabla 2 Altitudes de la Atmósfera (AstroMía, 2015).....	31
Tabla 3 Clasificación de la OMM (Renom)	40
Tabla 4 Tipos de Nubes.	41
Tabla 5 Valores Típicos de diferentes propiedades de las Nubes.....	44
Tabla 6 Prueba 1.....	62
Tabla 7 Prueba 2.....	64
Tabla 8 Prueba 3.....	66
Tabla 9 Prueba 4.....	67
Tabla 10 Prueba 5.....	69
Tabla 11 Prueba 6.....	71
Tabla 12 Prueba 7.....	73
Tabla 13 Nube 1 Datos de Tablas de Vapor.	78
Tabla 14 Nube 1, Flujo de Agua.	79
Tabla 15 Nube 1 Flujos.	80
Tabla 16 Nube 1, Balance de Energía.....	83
Tabla 17 Cp de Agua, Aire y Nitrógeno.....	83
Tabla 18 Nube 2, Valores de las Tablas de Vapor.....	87
Tabla 19 Nube 2, Flujo de Agua.	87
Tabla 20 Nube 2, Flujos.	87
Tabla 21 Nube 2, Balance de Energía.....	88
Tabla 22 Imágenes de la Nube 1.	90
Tabla 23 Imágenes de la Nube 2.	92

INTRODUCCIÓN

Arte y ciencia, dos palabras que en ocasiones consideramos que se contraponen, sin embargo tienen más en común de lo que creemos y pueden trabajar conjuntamente para formar eventos impresionantes al ojo humano.

Esencialmente el arte consiste en crear, en transformar, en manifestar la producción de estructuras. Simultáneamente toda obra de arte, sea natural o creada por el hombre, posee información que se transmite a un espectador, formando así un vínculo entre el artista y quien observa y experimenta la creación.

Consideremos ahora el caso de la ciencia, el científico produce información y la ciencia requiere espectadores que juzguen, valoren y verifiquen dicha información. Visto de este modo parecería que la ciencia difiere del arte en que ésta última sólo se contempla y se disfruta mientras que la ciencia, además, necesita comprobarse mediante la reproducción del fenómeno estudiado y la constatación del mismo. Un científico disfruta de la satisfacción que le produce el éxito de un experimento bien diseñado. De esta forma, ubicándonos en el campo artístico, un creador inventa una nueva manera de ver y expresarse, inspirándose en lo existente y afectando a sus seguidores. Cabe resaltar que en ambas actividades hay escuelas, doctrinas, teorías, técnicas particulares y específicas y compromisos.

Se dice que arte es representación, es una producción de una emoción estética, y que la ciencia es una representación a escala del mundo y la reproducción de fenómenos a partir de ella, su propósito es producir conocimiento certero, general y específico.

Como parte de una colaboración INBA-UNAM-IPN se busca el desarrollo de proyectos escénicos en los cuales la ciencia y la tecnología formen una parte importante en el peso de la ejecución del proyecto.

El presente proyecto tiene el objetivo de llevar de la mano al espectador por la presentación de diferentes tipos de nubes (las cuales se forman a diferentes alturas

en la atmósfera) en escena, para ello se propone un Diseño a escala de un espacio experimental cerrado en donde se experimente dicha formación de nubes.

Dicha puesta en escena tendrá colaboración económica por medio de diferentes fondos para el fomento de las artes, en el área de artes escénicas (teatro y performance) como son FONART, Jóvenes creadores, entre otras, teniendo el compromiso de ejecutar en escena los proyectos finales novedosos y que se puedan ejecutar en diferentes muestras a nivel nacional y, de ser posible, internacional.

Debido a la necesidad de buscar nuevas puestas escénicas contemporáneas se ha hecho una propuesta multidisciplinaria con el objetivo de integrar a la escenografía como parte activa, no solamente dependiente, de la composición, la cual será más allá de un efecto especial un actor más.

El efecto conjunto de una "caja negra" que simule diferentes tipos de nubes es el propósito principal para mostrar en una puesta en escena totalmente integradora entre arte y ciencia.

En el primer capítulo titulado *¿Por qué una cámara para formar nubes?* se presentan los antecedentes de las nubes formadas con anterioridad, los objetivos y la metodología de trabajo del proyecto.

El segundo capítulo titulado *La teoría de las nubes* comprende los conceptos generales de las nubes, los tipos de nubes que existen dependiendo de la altura y del modo en que se formen, así como los factores que afectan en su formación. También incluye una breve descripción de los meteoros.

Posteriormente en el tercer capítulo *Diseño e Instrumentación de la cámara de niebla* se presentan las pruebas realizadas en el laboratorio y el análisis del sistema a considerar para el Diseño de la cámara. También se presenta la memoria de cálculo del diseño de la cámara de niebla, los instrumentos de control requeridos para la misma y los diagramas de la escala, que son el DFP, el DTI y el diagrama de integración visual de la escala.

En el cuarto capítulo *Formando una nube* se presentan las pruebas realizadas en la escala, sus respectivas gráficas y respectivos análisis.

Finalmente el quinto capítulo *Calculando una nube* comprende los balances de materia y energía realizados a partir de las pruebas en la escala, se analizan dos casos de estudio (Nube 1 y Nube 2) y se presentan algunas fotos realizadas en el momento de la presentación en el Instituto de Bellas Artes.

CAPÍTULO 1

1. ¿POR QUÉ UNA CÁMARA PARA FORMAR NUBES?

¿Se dirá que los dioses cascan las nubes cuando las nubes son malditas por el trueno, se dirá que lloran cuando aúlla la atmósfera? ¿Serán los arcoíris el color de sus túnicas?

Dylan Thomas

1.1 ANTECEDENTES

La primera nube formada artificialmente fue en el año 2010 en el interior del Hotel MariaKapel por el artista Berndnaut Smilde. Nació en 1978 en Groningen, Holanda. Actualmente vive y trabaja en Amsterdam. Ha presentado su obra por toda Holanda además de Toronto, Taipei, Estambul, Dublin, París, Londres y San Francisco. En el 2013, tuvo su primera gira por Estados Unidos en Louisville, Kentucky y en Maastricht. Sus nubes han sido reconocidas por la revista TIME dentro de los 10 mejores inventos del 2012. (Smilde, 2015)

Su primera obra se tituló “Nimbus”, se refiere a una serie de nubes y el evento consiste en formar pequeñas nubes en habitaciones con atmósferas controladas por Smilde. (Sonia, 2015)

Smilde regula la humedad, temperatura y luz de un espacio. Posteriormente con ayuda de una máquina de nube crea su arte. Lamentablemente no es algo que pueda ser sostenido durante mucho tiempo, solamente lo necesario para que la nube sea fotografiada.

“Está allí solamente por un breve momento y luego se desarma”, afirma Smilde. “Es el potencial de la idea, pero al final, nunca funcionará. Quería crear una imagen muy clara, casi un cliché, una caricatura de la visualización de tener mala suerte”. (Whistle, Canut, & Rivera, 2015)

Las siguientes imágenes son algunos de los trabajos que Smilde ha hecho por todo el mundo.

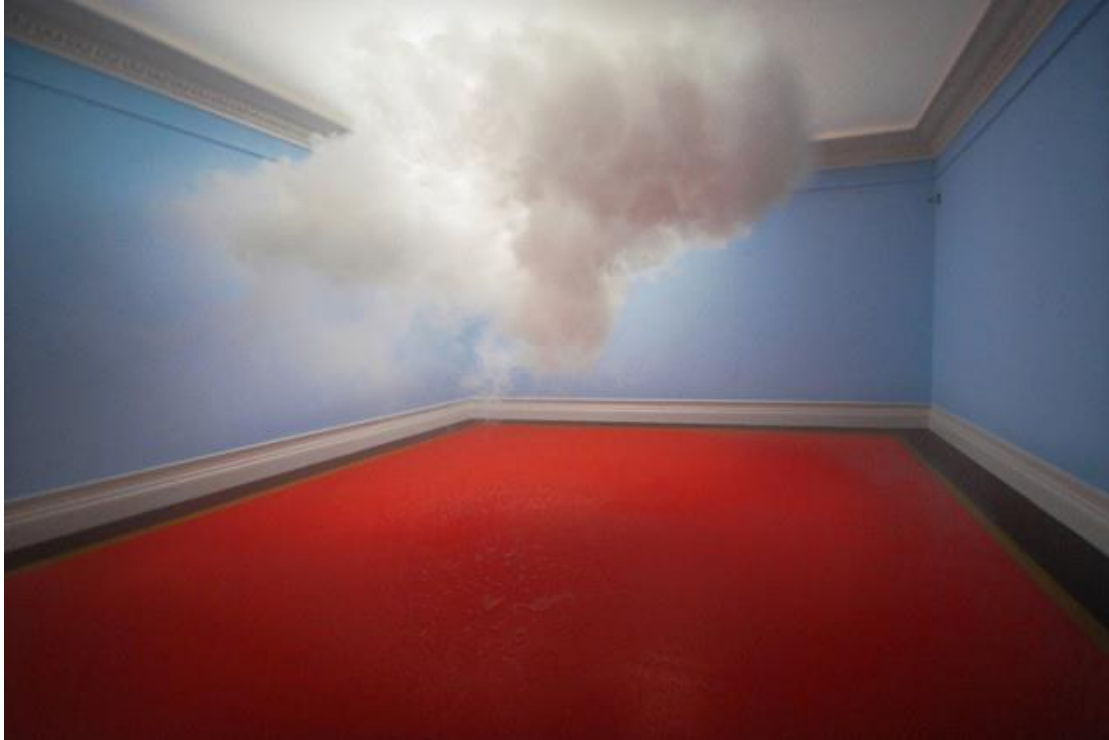


Ilustración 1 Nimbus Probe 2010 (Gameró, 2015)



Ilustración 2 Nimbus Platform (Gameró, 2015)



Ilustración 3 Nimbus Minerva 2012 (Gamero, 2015)



Ilustración 4 Nimbus II 2012 (Gamero, 2015)

Ahora bien, sobre el Mundial de Fútbol en Qatar. Durante el verano en este país la temperatura llega hasta los 50°, esto ha provocado polémicas a lo largo de todo el mundo provocando que Qatar busque una solución que parece ser han sido las nubes artificiales, además de cambiar la fecha del mundial a invierno. Varios científicos se reunieron consiguiendo crear una nube mecánica formada por un novedoso componente de carbono, en el interior de la nube se inyecta gas helio para que ésta pueda mantenerse flotando, dicho aparato será movido por energía solar y estará planeando sobre el estadio de acuerdo a la posición del sol, protegiéndolo de los rayos solares y disminuyendo la temperatura hasta los 20°C.



Ilustración 5 Fotografía del estadio en Qatar con la nube artificial. (Javier, 2015)

Por otro lado las nubes modificadas artificialmente, aunque no son nubes creadas artificialmente, es importante mencionarlas porque pueden considerarse como las antecesoras de éstas. Se modifican con la finalidad de hacer que precipiten en zonas donde no es muy común la lluvia, a este proceso se le conoce como sembrado de nubes.

Fue descubierto por Vincent Joseph Schaefer (investigador en el *General Electric Research Laboratory*) en 1946. Inicialmente creó una manera de experimentar con las nubes sobreenfriadas utilizando una unidad de congelamiento forrada con terciopelo negro. Sin embargo, éste equipo de congelamiento no era suficiente para crear una nube a partir del aire atmosférico por lo que añadió un pedazo de hielo seco con el objetivo de disminuir la temperatura del equipo de congelamiento, al introducir la cabeza se dio cuenta de que había cristales de hielo, iniciando así la ciencia meteorológica experimental y el control del clima. (Británica, 2015)

En el mismo año el físico químico Bernard Vonnegut en su trabajo en el mismo laboratorio descubrió otro método para sembrar nubes a partir de yoduro de plata. Ambos métodos fueron patentados, a pesar de ello el más utilizado es la siembra de nubes por yoduro de plata. (Ztfnews, 2015)

El yoduro de plata tiene una estructura molecular similar a la del hielo, esto permite que el agua se condense de forma más eficiente alrededor de éstas partículas (funcionan como nucleótidos) formando gotas de agua las cuales con el tamaño suficiente podrán caer en forma de precipitación.

Existen tres métodos de siembra de nubes:

1. Siembra Estática: involucra esparcimiento de químicos como el yoduro de plata dentro de las nubes.
2. Siembra Dinámica: se aplica con las nubes de corrientes verticales las cuales a lo largo de toda la nube contienen más agua, lo que significa más lluvia. En este método son usados 100 veces más cristales de yoduro de plata que en el estático. Este proceso es un poco más complejo que el estático, puede ser descrito en 11 etapas; sin embargo un resultado inesperado en la primera etapa podría ocasionar que el método entero no funcione, ocasionando que esta técnica sea menos confiable que la estática. (William R. Cotton).
3. Siembra Higroscópica: dispersa sales en las partes bajas de las nubes a través de bengalas o explosivos. Las partículas de sales crecen conforme el agua se adhiere a éstas. El Dr. Cotton piensa que la siembra de nubes

higroscópica tiene una gran potencia, sin embargo aún requiere investigaciones. (Huggins, 2015)

Las formas físicas en las que se siembra las nubes de acuerdo a *Weather Modification Incorporated* pueden ser por vía aérea , donde la inyección de agentes es directa a través de aviones, y la otra cuando son inyectadas desde el nivel del piso, esto es para aquellas nubes bajas sobre terreno complejo. (Ground, 2015)

Estudios realizados por el Dr. Nalbandyan demuestran que otra forma de hacer que las nubes precipiten es a través de ondas acústicas. Las nubes son sometidas a ondas acústicas de 140 dB por varios minutos, esto ocasiona que las moléculas de agua colisionen entre sí formando gotas de forma más rápida, que de otra manera se hubieran formado a través de colisiones ocasionadas por corrientes de aire. (Nalbandyan, 2011)

1.2 OBJETIVO

Establecer las condiciones mínimas para formar una nube, y posteriormente, mantener su formación durante varios minutos estableciendo los parámetros para hacer el diseño de una estructura escala de tamaño óptimo que permita producir y reproducir en ella dichas condiciones y que permita establecer mejoras para la construcción de la estructura de tamaño real.

1.3 METODOLOGÍA DEL TRABAJO

Búsqueda bibliográfica

Examinar diferentes artículos sobre el estudio de la naturaleza del ciclo del agua y en particular de la formación de nubes.

Apoyarse en el “Atlas Internacional de Nubes” de la Organización Mundial Meteorológica.

Prueba de Laboratorio

Se realizarán pruebas de laboratorio con nitrógeno líquido y vapor de agua para ver la factibilidad de la formación de nubes. Dichas pruebas de laboratorio serán el sistema a analizar para el diseño de la escala en el Capítulo 3.

Planeación del espacio a escala

A partir de las necesidades de los espacios físicos que se proponen o se tienen para hacer las pruebas y de las pruebas hechas en el laboratorio se diseñara el espacio a escala en el que se puedan llevar a cabo las pruebas del concepto.

Propuestas diagramas o planos de la “planta piloto” (modelo a escala)

Con base a lo planeado del espacio a escala se realizarán los siguientes diagramas.

- Diagrama de Flujo de Proceso (DFP).
- Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI).
- Realizar el diseño de integración visual de la escala.

Construcción

Establecer los requerimientos constructivos del modelo a escala

Seguimiento de la construcción del modelo a escala, así como también realizar los ajustes necesarios en esta para lograr el objetivo deseado.

Puesta en marcha

- Realización de pruebas de los equipos a utilizar en la escala
- Realización de pruebas previas dentro de la escala
- Realización de pruebas del proceso total para cubrir las especificaciones de tiempo del proceso

Balances de materia y energía

A partir de la información bibliográfica y de las pruebas en la escala, se calcularán los balances de vapor de agua, nitrógeno y partículas suspendidas necesarias, así como también los balances de energía para agua y nitrógeno en las diferentes etapas del proceso de cambios de estado y visuales.

CAPÍTULO 2

2. LA TEORÍA DE LAS NUBES

"Even small changes in the abundance or location of clouds could change the climate more than the anticipated changes caused by greenhouse gases..."¹

NASA

¹ N. del A.: Incluso el más pequeño cambio en la cantidad y ubicación de las nubes podría generar un cambio en el clima mayor al que se prevé por el efecto invernadero.

Las gotas de agua son uno de los componentes que se encuentran con más frecuencia en la atmósfera. Dependiendo de la altura a la que se encuentren y de las condiciones de temperatura y presión, pueden formar diversos tipos de nubes, o bien niebla o neblina. Si las gotas de agua se aglomeran a altitudes grandes se les conoce como nubes o bien si se aglomeran al nivel de la tierra se les conoce como neblina o niebla.

Las condiciones en que se encuentran las gotas de agua en suspensión tienen un alto impacto en las condiciones atmosféricas y en el ambiente, independiente de la forma que éstas tomen.

Para un estudio más detallado y que permita predecir ciertos comportamientos dinámicos de las nubes, el conocimiento de los parámetros dimensionales de éstas en combinación con las concentraciones de agua en cada nube (humedad), facilita la clasificación de las nubes de acuerdo a sus mecanismos de crecimiento.

Existen diversos métodos para clasificar los tipos de nubes. Se han determinado distintas clasificaciones, ya sea por dinámica o características físicas (distribución, tamaño de las partículas, entre otros aspectos), los distintos tipos de familias es la clasificación más empleada (Sorin, Valeriu, Sabina, & Boscornea, 2014).

2.1 ATMÓSFERA

Antes de entrar al tema de nubes, es necesario hacer un pequeño recordatorio sobre la atmósfera.

La palabra atmósfera se deriva de las raíces griegas *atmós* (vapor) y *sphair* (esfera). La atmósfera es la capa gaseosa exterior de la Tierra de baja densidad, ésta es gaseosa y su constitución de gases (Aire) varía respecto a la presión y la altitud a la que se encuentren. También se compone de partículas no gaseosas como polvos, sales, etc, suspendidas.

El 75 % de masa atmosférica se encuentra en los primeros 11 Km de altitud, la fase gaseosa está compuesta principalmente, en porcentaje volumen, de Oxígeno

(78.09%) y Nitrógeno (20.95%), además de Argón (0.93%) y Dióxido de Carbono (0.03%), entre otros (Tabla 1). (Distancia, 2015)

Tabla 1 Composición del aire seco a nivel del mar.

Componente	% en Volumen	Componente	% en Volumen
N₂	78.085	Kr	1.1x10 ⁻⁴
O₂	20.946	H₂	5.8 x10 ⁻⁵
Ar	0.934	N₂O	3.1 x10 ⁻⁵
CO₂	0.0314	CO	1 x10 ⁻⁵
Ne	0.00182	Xe	8.7 x10 ⁻⁶
He	0.000524	O₃	(1-50) x10 ⁻⁶
CH₄	0.00015	NH₃	(0.01-1) x10 ⁻⁷

La atmósfera ha sido modificada tanto por las emisiones volcánicas así como por la actividad humana, dichas emisiones pueden ser diferentes gases y partículas contaminantes que tienen una gran influencia en los cambios climáticos y a su vez repercute en la estabilidad de las nubes.

La atmósfera se divide en varias capas:

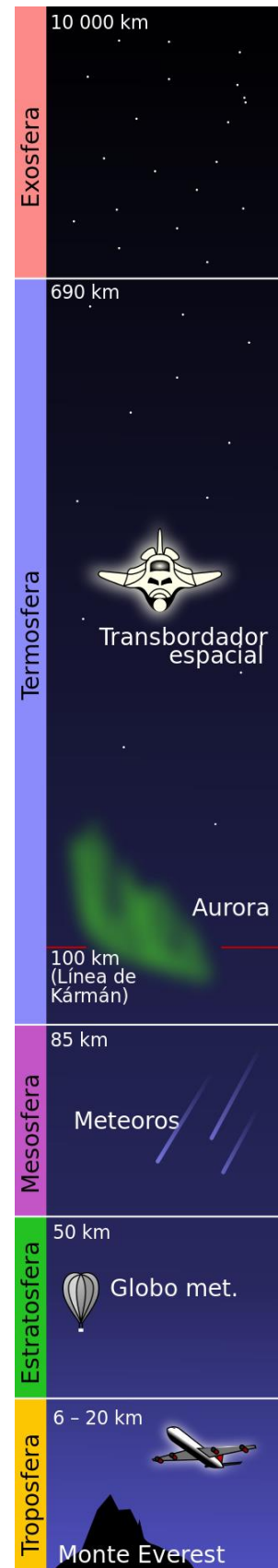
La tropósfera: es la primera capa y su límite superior se llama tropopausa. El término Tropósfera viene del griego *tropos* que significa girar, se le asigna este nombre porque es la capa donde se producen corrientes verticales y horizontales de aire y también donde hay mayor humedad. Abarca desde la corteza terrestre hasta los 9Km de altura en los polos y en el ecuador llega hasta los 18km. En esta región se forman las nubes y se producen fenómenos climáticos como la lluvia. La temperatura va disminuyendo conforme aumenta la altura hasta llegar alrededor de los -70°C. (Anónimo).

La estratósfera: comienza a partir de la tropopausa y termina en la estratopausa (límite entre la estratósfera y la mesósfera), a 50 km de altitud. La palabra *stratum* significa capa estratificada debido a que en esta región la temperatura cambia, en

lugar de disminuir va aumentando hasta llegar a ser de alrededor de 10°C en la estratopausa. Los movimientos del aire decrecen con la altura en la parte baja de la estratósfera (25 Km), sin embargo los vientos horizontales llegan a alcanzar frecuentemente los 200 km/h, facilitando que cualquier sustancia que llega a la estratósfera se difunda por toda la Tierra con rapidez (que es lo ocurre con los Cluorofluorocarbonos). Esta capa es muy seca, por lo tanto, sin nubes. En esta parte se encuentra el ozono, entre los 30 y los 50 km, que sirve como filtro de la radiación ultravioleta. La presencia del Ozono es la responsable del incremento de la temperatura en esta capa, pues absorbe la radiación UV dando lugar a un calentamiento de la estratósfera donde las máximas temperaturas se observan alrededor de los 50 km.

La mesósfera: se deriva de la palabra griega meso que significa media, se extiende alrededor de los 50 km hasta los 80 km de altura, contiene aproximadamente el 0.1% de la masa total del aire. Es importante por la ionización y las reacciones químicas que ocurren en ella. En la mesósfera las naves espaciales que entran a la Tierra empiezan a notar la estructura de los vientos de fondo y el freno aerodinámico. En esta capa se encuentran las nubes noctilucen-tes. (Phillips D. T., 2015)

En la ionósfera, algunos autores la conocen como termósfera, la temperatura aumenta con la altura debido a la absorción de la radiación solar por el oxígeno y el nitrógeno (longitud de onda de 0.2 μm) ocasionado la disociación de estas moléculas, principalmente la del oxígeno. Se extiende aproximadamente desde una altura de 80 km sobre la superficie terrestre hasta los 640 km o más. Tiene una gran



influencia sobre la propagación de las señales de radio. Parte de la energía radiada por un transmisor es absorbida por el aire ionizado y otra es refractada hacia la superficie de la Tierra, este efecto permite la recepción de señales de radio a distancias mayores de lo que sería posible con ondas viajando por la superficie terrestre. (AstroMía, 2015)

Finalmente la exósfera es la capa posterior a la ionósfera, se extiende hasta los 9,600 km (límite exterior de la atmósfera). Posterior a esta se encuentra la magnetósfera, espacio situado alrededor de la Tierra en el cual, el campo magnético del planeta domina sobre el campo magnético del medio interplanetario. (AstroMía, 2015)

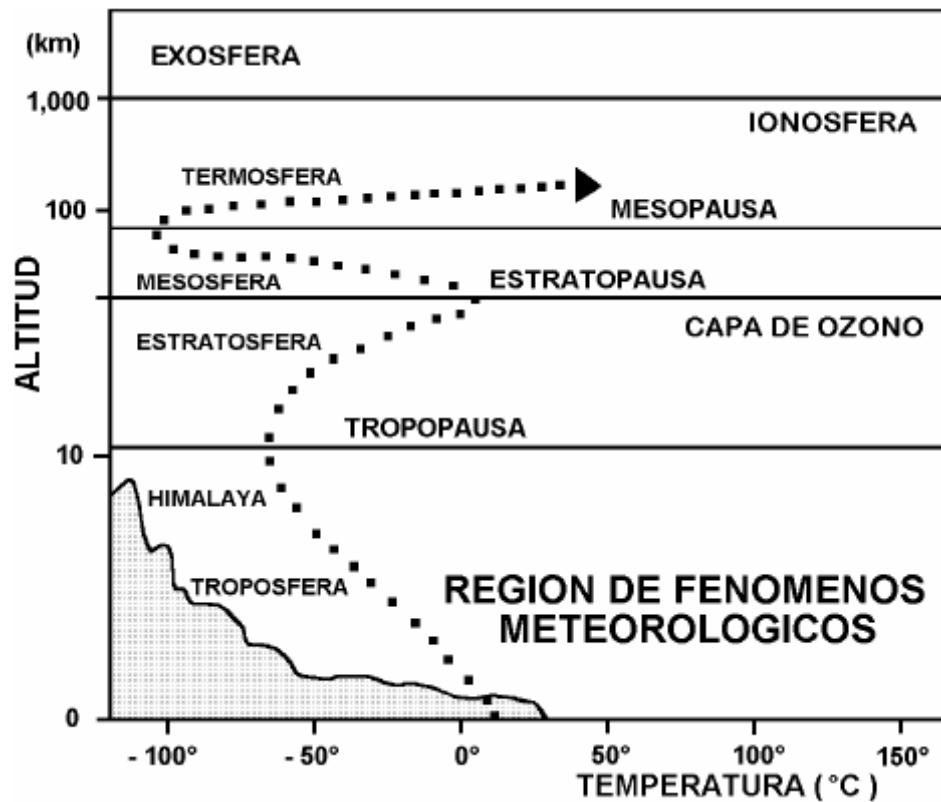


Ilustración 6 Capas de la Atmósfera (Anónimo)

2.2 ¿HIDROMETEORO O NUBE?

Un meteoro puede ser una suspensión, precipitación o un depósito de partículas líquidas acuosas las cuales se encuentran en conjunto con partículas sólidas o un fenómeno natural que puede ser óptico o eléctrico, que se observa en la atmósfera.

Existen diversos tipos de meteoros, sin embargo, basándonos en la naturaleza de las partículas que los constituyen o de los procesos físicos que los forman, los podemos clasificar en cuatro grupos:

2.2.1 HIDROMETEOROS

Es un meteoro que consiste en un conjunto de partículas de agua líquida o sólida (gotas de agua o partículas de hielo) suspendidas en la atmósfera, principalmente en la Tropósfera, que pueden ser arrastradas por el aire para terminar en la superficie terrestre o en alguna parte de la atmósfera diferente a su posición original.

Con base a lo anterior podemos decir clasificarlos en dos grupos:

- Los hidrometeoros están constituidos principalmente por la suspensión de partículas en la atmósfera, que son las nubes y niebla. Aquellos que concluyen con precipitación, ya sea en forma de lluvia, nieve, hielo granulado y granizo, básicamente.
- Los hidrometeoros consisten en partículas arrastradas por el viento desde la superficie de lagos, mares y ríos, principalmente ventisca y espuma. Los hidrometeoros que están formados por un depósito de partículas, como lo son el rocío y la escarcha.

2.2.2 LITOMETEOROS

Son suspensiones en la atmósfera como las partículas de polvo pequeñas, las partículas de sal marina o humo de incendios. También existen aquellos que son producto de las tempestades de arena o de los remolinos de polvo o arena.

La mayoría de las partículas que los integran son líquidas y no acuosas. Generalmente, las partículas pueden estar suspendidas en el aire o ser levantadas por el viento.

2.2.3 FOTOMETEOROS

Son fenómenos luminosos generados a partir de la reflexión, refracción, difracción o interferencia de luz, en estos casos proviene del Sol y/o la Luna. Se observan principalmente en el interior de las nubes, como los fenómenos de haloⁱ, arco irisⁱⁱ, anillo de Bishopⁱⁱⁱ y rayos crepusculares^{iv}. Cuando se observan en el aire, son espejismos^v, trepidaciones ópticas^{vi} y los famosos colores crepusculares.^{vii}

2.2.4 ELECTROMETEOROS

Es la manifestación visible y/o audible de electricidad en la atmósfera. Son descargas eléctricas continuas, como es el caso de relámpagos y truenos, esencialmente, también en esta categoría entran el fuego de San Telmo^{viii} y la Aurora Polar^{ix}, se forman en la ionósfera. (Mundial, 1993)

2.3 ¿QUÉ ES UNA NUBE?

Es el elemento de la atmósfera o hidrometeoro que consiste en partículas, generalmente, de pequeño tamaño, aunque también pueden ser de mayor dimensión. Estas pueden ser de agua líquida, hielo o ambas, también pueden encerrar partículas líquidas no acuosas o partículas sólidas procedentes de gases industriales, humo o polvo. . (Mundial, 1993)

La naturaleza (composición), el tamaño, la cantidad y la distribución de las partículas dan la apariencia a la nube. Todos estos aspectos darán a la nube características como tamaño, forma, estructura, textura, luminancia y color, lo que da paso a una clasificación de estas; así mismo la apariencia dependerá de la intensidad y cantidad de luz recibida y de la posición de la luz respecto la del observador.

2.3.1 ¿CÓMO SE FORMAN?

Las nubes se forman por el principio de nucleación, que involucra, entre otros factores, el cambio de estado de agregación del agua:

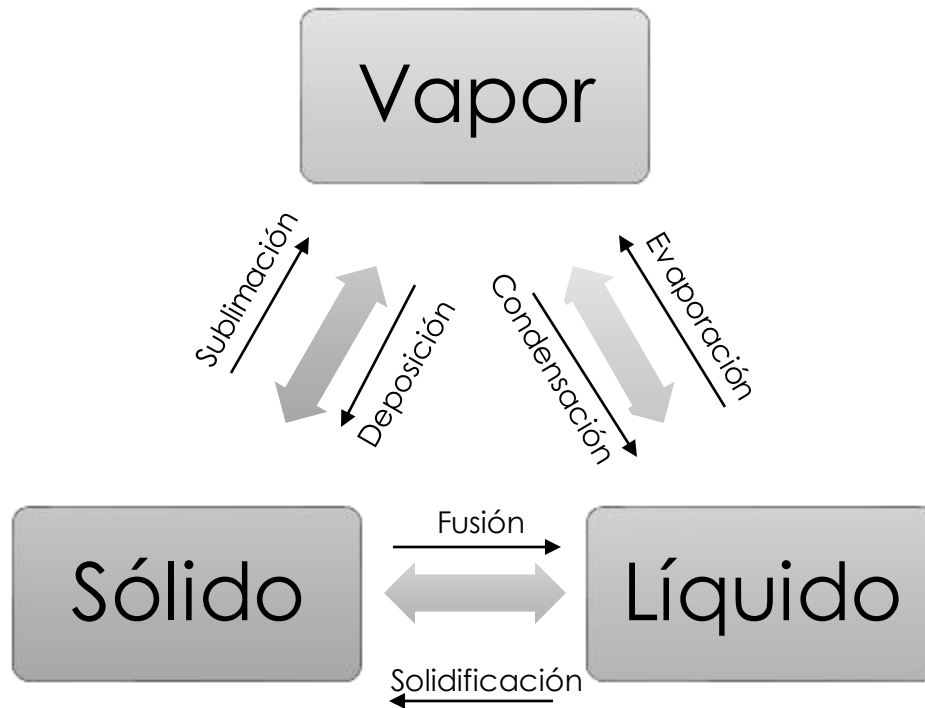


Ilustración 7 Cambio de Fase del agua

Los cambios más importantes de estado de agregación son condensación, solidificación y sublimación. Las gotas de agua están sometidas a una intensa fuerza de tensión superficial, por lo que para poder aumentar su tamaño a partir del vapor de agua en la atmósfera y por condensación, el gradiente de presión de vapor de agua debe de ser mayor que la fuerza de tensión superficial.

“La saturación es una condición de equilibrio, en la cual las velocidades de evaporación y condensación son iguales. Debido a la barrera de energía libre de las gotitas, el cambio de fase no ocurre en las condiciones de equilibrio de la masa de agua, o sea, las gotitas comenzaran a evaporarse solamente

(cuando tenemos vapor de agua puro) cuando la humedad relativa alcanza valores de varios cientos por ciento.” (Renom)

Básicamente la formación de nubes involucra, a grandes rasgos, los siguientes procesos:

- Crecimiento por condensación y evaporación de gotas.
- Coagulación de las gotas al chocar.
- Pulverización de las gotas. (Nalbandyan, 2011)

NUCLEACIÓN

La Nucleación es el fenómeno de condensación de vapor de agua para generar gotas en un medio físico y existen dos tipos, la *nucleación homogénea* y la *nucleación heterogénea*. La nucleación homogénea se da cuando en la atmósfera existe una sobresaturación. En la atmósfera hay presencia de partículas de tamaño microscópico con una gran afinidad con el agua las cuales actúan como centros de condensación, éstas partículas se denominan *núcleos de condensación*, por lo que la mayoría de las gotas de agua se forman por éste último proceso (nucleación heterogénea).

El hecho de que las gotas de agua formadas sean estables o no, dependerá de si superan el tamaño crítico, que está determinado por la velocidad de equilibrio de evaporación y condensación, que a su vez dependerá de nivel de saturación en la atmósfera y en algunos casos, de las corrientes de aire ascendentes.

En la nucleación homogénea la velocidad de crecimiento depende de la presión parcial del vapor de agua en la atmósfera, de la temperatura de la gota y de la tensión superficial. Entre más grande sea la presión parcial del vapor de agua, la velocidad de crecimiento aumentará, de acuerdo a la temperatura a la que se encuentre variará la evaporación de la gota y en cuanto a la tensión superficial de la gota, las moléculas de la superficie deben tener mayor energía que la que las retiene en la gota para poder regresar a la atmósfera.

Llegados a este punto el vapor de agua y el líquido están en equilibrio por lo que la presión de vapor será igual a la presión de saturación.

En el caso de la Nucleación Heterogénea las gotas de agua se forman sobre los núcleos de condensación o núcleos higroscópicos^x, que en la mayoría de los casos, son partículas provenientes de aerosoles o partículas de polvo. Los NC (aerosoles) se clasifican en higroscópicos, neutros o hidrófobos. (Renom)

En este caso la velocidad de formación depende de la cantidad de núcleos existentes en la atmósfera y del tipo de aerosol. Para un aerosol neutro se requiere la misma saturación que en la nucleación homogénea. Sobre un hidrófobo, debido a su naturaleza de repelencia al agua, la saturación tendrá que ser mayor que en el caso del aerosol neutro y contrario a estos, para los aerosoles higroscópicos, que poseen afinidad al agua, la saturación puede ser incluso menor que en los neutros.

NÚCLEOS DE CONDENSACIÓN DE NUBES (NCN)

Posterior a la saturación comienzan a adherirse pequeñas partículas de agua sobre los Núcleos de Condensación, estos son llamados núcleos de condensación de nubes (NCN), en inglés (CCN) por cloud condensation nuclei.

De acuerdo a los estudios realizados por la doctora Renom de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) los aerosoles atmosféricos abarcan una gran variedad de tamaños de partícula, desde iones de 10^{-13} μ hasta partículas de polvo de 10 μ . La concentración de aerosoles se expresa como el número de partículas por centímetro cúbico de aire.

La Dra. Renom clasifica las partículas por tamaño de la siguiente manera,

- Núcleos de Aitken, radios entre $5 \cdot 10^{-3}$ y $2 \cdot 10^{-1}$ μ .
 - Núcleos Grandes, radios entre 0.2 y 1 μ .
 - Núcleos gigantes, radios mayores a 1 μ .

En el caso de partículas de radio inferior a esta clasificación coagulan con partículas mayores, por ello no se mencionan. Por otro lado las partículas mayores a estos

tamaños sólo pueden permanecer en el aire por cortos periodos de tiempo debido a que posterior a esto caen por gravedad. Cabe destacar que los pequeños iones no participan en la formación de gotas debido a que se requeriría una sobresaturación.

El hecho de que se dé o no la condensación de agua en el núcleo dependerá de la sobresaturación, además de que la saturación será fijada por el tamaño de partícula del NCN y de la solubilidad del mismo (tipo). De esta forma para que una partícula de aerosol pueda actuar como NCN en una saturación de 1% una partícula insoluble necesita tener cerca de 0.1μ de radio, mientras que partículas solubles pueden ser tan pequeñas como 0.01μ radio. La proporción de aerosol que sirve como NCN es pequeña (cerca del 1% en el aire continental y cerca del 10-20%, en el aire marítimo), además la mayoría de los NCN consisten en una mezcla de componentes solubles e insolubles (también llamados núcleos mixtos). (Renom)



Ilustración 8 Fuentes de aerosoles (Renom)

Hasta este punto solamente se ha estudiado como se forman las gotas de agua en la atmósfera, ahora se explicará cómo en conjunto estas gotas de agua dan paso a las nubes.

La velocidad de crecimiento de cada una de las gotas además de depender de las fuerzas de tensión superficial y de la humedad del aire, también depende del gradiente de transferencia de masa del vapor de agua hacia la gota y del calor de condensación de la gota. Al considerar una gran cantidad de gotas diminutas de agua, las gotas compiten por el vapor de agua disponible, por lo tanto su velocidad de crecimiento dependerá de la concentración, tamaño y naturaleza del núcleo, de la velocidad de enfriamiento del área de la gota, pues controla su tamaño y sobresaturación y de la intensidad de los movimientos turbulentos en la nube. (Renom)

De acuerdo al artículo de la Dra. Renom, dos importantes mecanismos fueron identificados para explicar la formación de gotas de lluvia

1. Proceso de Bergeron.
2. Proceso de colisión-coalescencia.

PROCESO DE BERGERON O PROCESO DE CRISTALES DE HIELO.

El proceso Bergeon, también conocido como Proceso de Cristales de Hielo, propone la coexistencia de gotas de agua y de hielo. El proceso sólo es aplicable a nubes con temperaturas por debajo de 0°C y a las nubes formadas en latitudes medias y altas. Para explicar este proceso es necesario recordar dos propiedades del agua, la primera referente al punto de fusión del agua y la segunda a la presión de vapor de saturación.

Respecto al punto de fusión, que para este caso podríamos llamarlo punto de congelación, las gotas de agua de las nubes no se congelan a 0°C como se esperaría. Podemos atribuir este fenómeno a la baja presión a la que están sometidas las gotas de agua. El agua pura congela a 0°C a condiciones estándar,

a menor presión la temperatura disminuirá proporcionalmente, por lo que a altitudes grandes la presión atmosférica será menor y la temperatura de congelamiento también disminuirá, que es precisamente lo que sucede en la Tropósfera. Por lo que el agua suspendida en el aire no congela hasta alcanzar una temperatura alrededor de -40°C . En la siguiente tabla podemos observar presiones y temperaturas a diferentes altitudes en la atmósfera.

Tabla 2 Altitudes de la Atmósfera (AstroMía, 2015)

<i>Altitud (Km)</i>	<i>Presión (atm)</i>	<i>Densidad (Kg/m³)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>
0	1.00	1.226	15.0
1	0.89	1.112	8.5
2	0.78	1.007	2.0
3	0.69	0.910	-4.5
4	0.61	0.820	-11.0
5	0.53	0.736	-17.5
10	0.26	0.413	-50.0
15	0.12	0.194	-56.5

La formación de cristales de hielo será más sencilla cuando las gotas superenfriadas (agua por debajo de los 0°C) se agrupen sobre la superficie de una partícula sólida llamada núcleo de congelamiento, parecida a los NCN. Contrariamente a los núcleos de condensación, los núcleos de congelamiento son menos abundantes en la atmósfera y generalmente no se tornan activos hasta -10°C . Por tal motivo las nubes con temperatura entre 0 y -10°C están típicamente compuestas de gotas de agua superenfriada. Entre -10°C y -20°C las nubes están formadas por las gotas líquidas y cristales de hielo. Debajo de los -20°C (temperatura de activación de muchos núcleos de congelamiento) las nubes usualmente consisten en su totalidad de cristales de hielo. (Renom)

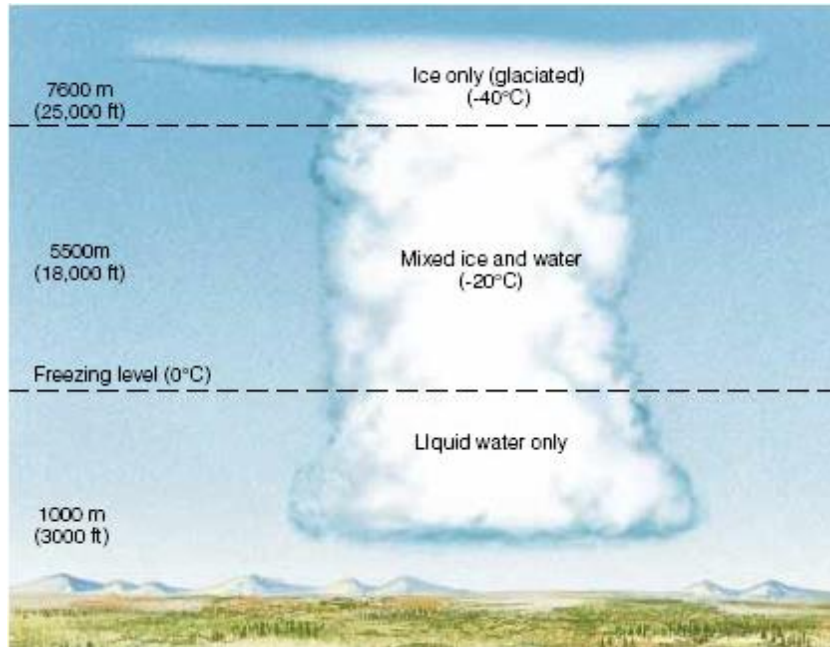


Ilustración 9 Distribución de Hielo y Agua en una nube Cumulonimbus (Renom)

Además de la formación de gotas de hielo y nubes a determinadas alturas las fuertes corrientes de ascenso dentro de algunas nubes (como la cumulonimbus, Ilustración 9) transportan gotas líquidas hacia arriba ocasionando su congelamiento. Podemos deducir que esta es una fuente importante de cristales de hielo en nubes de tormenta.

Ahora bien, respecto a la presión de vapor de saturación, ésta es menor sobre cristales de hielo que sobre gotas de agua superenfriada. Esto ocurre porque los cristales de hielo son sólidos, lo que significa que las moléculas de agua individuales en el hielo son más fácilmente mantenidas juntas que las gotas líquidas. Este efecto provoca que a las moléculas de agua les resulte más sencillo escapar de la superficie de las gotas líquidas que de las de hielo (Ilustración 10).

Lo anterior explica porque el proceso Bergeron depende de la diferencia de presión de vapor sobre el hielo y el agua. Consideremos una nube de -10°C , cada cristal de hielo está rodeado por miles de gotas líquidas, el agua que escapa de las gotas líquidas se adherirán a los cristales de hielo, haciendo crecer a mayor velocidad las gotas de hielo y desapareciendo las gotas líquidas.

“Si el aire está inicialmente saturado con relación al agua líquida, él está supersaturado con relación a los recién formados cristales de hielo. Como resultado de esta supersaturación, los cristales de hielo colectan más moléculas de agua que los que pierden por sublimación. La deposición remueve vapor de agua de la nube y por eso disminuye la humedad relativa por debajo de 100%, y las gotas líquidas se evaporan. La evaporación continua de las gotas líquidas suministra una fuente de vapor y los cristales de hielo crecen a expensas de las gotículas de agua superenfriada”. (Renom)

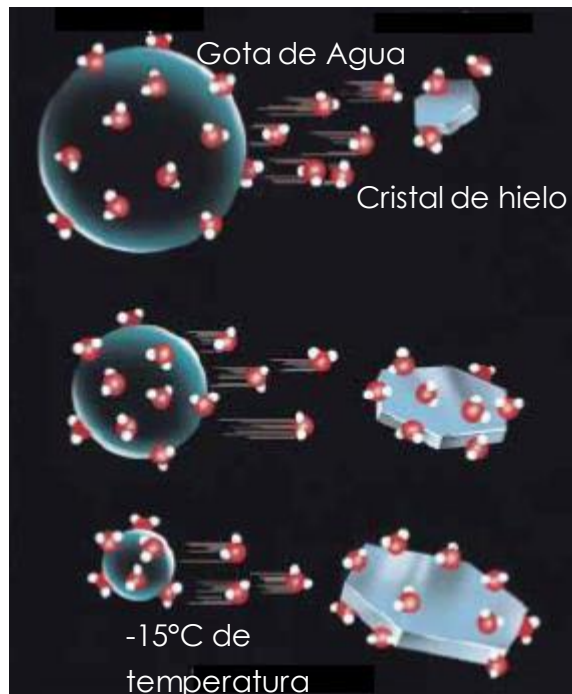


Ilustración 10 Proceso de Bergeron

Debido a que el crecimiento de los cristales de hielo generalmente es rápido, éstos alcanzan un tamaño suficiente para caer, durante el descenso estos cristales continúan creciendo conforme chocan contra gotas de agua de nubes localizadas por debajo de estos, a este proceso se le conoce como Acreción (Ilustración 11), como ejemplo de este proceso tenemos el granizo, el cual es producido únicamente en Cumulonimbus debido a las corrientes ascendentes fuertes y al suministro de agua superenfriada abundante. Las corrientes ascendentes hacen que el cristal

vuelva a empezar a caer desde arriba de la nube ocasionando que continúe creciendo por acreción.

Otra forma de que los cristales de hielo crezcan es por colisiones y adherencia. Dos o más cristales chocan o se adhieren formando cristales más grandes que podrían llegar a ser un copo de nieve. A este proceso se le conoce como Agregación (Ilustración 12). Cabe destacar que dependiendo de la temperatura de la superficie terrestre, estos copos pueden caer como tal o bien en forma de lluvia.



Ilustración 11 Cristales de hielo por Acreción.



Ilustración 12 Copo de nieve formado por Agregación.

El proceso de Bergeron es el proceso que siguen quienes siembran nubes con Yoduro de Plata, éstos actúan como núcleos de congelamiento.

PROCESO DE COLISIÓN COALESCENCIA

Ocurre en nubes con temperaturas mayores a -15°C , estas nubes están compuestas por gotas de agua líquida y para que se dé la precipitación el tamaño de la gota deberá tener un radio mayor a 20 μm , para que esto ocurra, los NCN tienen que ser grandes e higroscópicos, en este caso sal de mar. Las gotas grandes comienzan a caer chocando en el trayecto con gotas de menor tamaño,

adhiriéndose y haciendo una gota de mayor tamaño, conforme van cayendo se van haciendo aún más grandes, las corrientes ascendentes hacen que la gota, al igual que en proceso de acreción, vuelva a recorrer la nube desde arriba varias veces ocasionando que la gota aumente a un tamaño considerable para caer hasta la superficie terrestre sin evaporarse en el trayecto. A pesar de esto, la tensión superficial es superada por la resistencia del aire, la gota de agua termina partiéndose teniendo un diámetro de alrededor de 6 mm.

Por este proceso es el medio por el que, a través de ondas acústicas, se podría hacer llover a las nubes, pues incrementa el número de colisiones dentro de la nube, aumentando la velocidad de crecimiento de las gotas de agua. (Nalbandyan, 2011)

NUBES FORMADAS A PARTIR DE OTRAS

Una vía de formación es a partir de otra nube, llamada nube madre, se pueden presentar dos casos.

1. Cuando la nube se desarrolla a partir de otra nube se forman extensiones de la primera, más o menos pronunciadas las cuales se pueden o no agregar a la nube madre, que da como resultado una nube o nubes que pueden o no ser del mismo género que la nube madre. Estas nubes se nombran de la siguiente manera: primero se le asigna el nombre del género correspondiente de la nube formada seguido del nombre del género de la nube madre con el sufijo “genitus”.
2. La nube puede cambiar de un género a otro por transformación interna, en este caso la nueva nube recibe el nombre del género al que pertenece seguido por el género de la madre con el sufijo “matatus”.

TEORÍAS DE LA FORMACIÓN DE PRECIPITACIÓN

Ahora bien, a pesar de que las nubes están formadas por gotas de agua no todas precipitan. Para empezar las gotas de agua tienen un radio menor de 20 μm (para darnos una idea, un cabello tiene un diámetro de 75 μm), por ende su velocidad de

caída es pequeña y se evaporarán a escasos metros de la nube, además está la competencia por el agua superenfriada disponible, por lo que su crecimiento vía condensación es pequeño.

La velocidad de caída de la gota de agua de la nube depende de la fuerza de gravedad y de la fricción con el aire. La gota de agua comienza a caer por el efecto de gravedad, conforme va cayendo su velocidad va aumentando, simultáneamente el aire provoca una resistencia, cuando estas dos fuerzas se equilibran la velocidad de caída será constante (velocidad terminal o velocidad límite).

Analizando matemáticamente el sistema se puede aplicar la ley de Stokes para el cálculo de la fuerza de fricción:

$$F_{fr} = 6\pi r\eta v$$

Dónde:

- F_{fr} : Fuerza de fricción.
- π : pi.
- r : radio de la gota.
- η : viscosidad de la gota.
- v : velocidad de la gota.

Para el peso de a gota:

$$P = mg$$

Dónde:

- F : peso de la gota.
- m : masa de la gota.
- g : constante de gravedad.

En la velocidad terminal estas fuerzas son iguales por lo que:

$$mg = 6\pi r\eta v$$

La masa es igual al producto de la densidad por el volumen de la esfera, por lo tanto:

$$m = \rho \frac{3\pi r^3}{4}$$

Dónde:

- m: masa de la gota.
- ρ : densidad de la gota.
- π : pi.
- r: radio de la gota.

Entonces:

$$\rho \frac{3\pi r^3}{4} g = 6\pi r \eta v$$

Despejando la velocidad se obtiene:

$$v = \frac{2r^2 g \rho}{9\eta}$$

Considerando que ρ es la diferencia entre la densidad del aire y del agua, la ecuación final sería:

$$v = \frac{2r^2 g (\rho_g - \rho_a)}{9\eta}$$

Dónde:

- v: velocidad de la gota.
- η : viscosidad de la gota.
- ρ_g : densidad de la gota.
- ρ_a : densidad del aire.
- r: radio de la gota.
- g: constante de gravedad.

En la ecuación anterior podemos apreciar que entre mayor sea el radio de la gota de agua, mayor será su velocidad terminal, por ello la nube tiene que tener un radio lo suficientemente grande como para que no se evapore con la velocidad de caída o que las corrientes ascendentes no la regresen a la nube.

2.3.2 CLASIFICACIÓN.

A pesar de que las nubes están en continuo proceso de crecimiento y transformación y además de tener una gran variedad de formas, podríamos decir que no hay dos nubes iguales en el la Tierra, es posible agrupar las formas características observadas normalmente en todo el mundo, esto ha permitido establecer una clasificación en términos de género, especie y variedades.

Aunque no es muy común existen especies intermedias, pese a que no hay mucha diferencia de una a otra, es viable clasificarlas dentro de alguno de los grupos o géneros, sin tener que crear clasificaciones intermedias, además de que estas nubes son consideradas por el Atlas de las nubes de la Organización Mundial Meteorológica (OMM) como inestables, por lo que en algún momento entrarán en alguna de las clasificaciones.

Estos géneros se subdividen en especies basándose en la forma y en su estructura interna, dígase composición, tamaño de partícula, distribución, etc.

Después de la clasificación de especies sigue la variedad. La variedad se refiere a las características especiales que algunas nubes pueden o no presentar. Éstas están relacionadas con las diversas colocaciones de los elementos macroscópicos de la nube y de su grado de transparencia. A pesar de que la clasificación podría resultar un poco arbitraria, no lo es del todo, porque se establecen condiciones que el observador debe cumplir para clasificar una nube, sin embargo, esto puede dar como resultado que algunas características de la nube pertenezcan a más de una variedad.

De acuerdo a la “Organización Mundial Meteorológica” (OMM) las nubes pueden ser clasificadas por su aspecto físico, que es la que debe informar un observador, y se dividen en tres tipos: cirrus, cumulus y stratus:

- Cirrus son nubes fibrosas, altas, blancas y finas.
- Stratus son capas que cubren la mayor parte del cielo.
- Cumulus son masas globulares individuales tienen domos salientes.

Básicamente cualquier nube tiene alguna de estas tres apariencias o una combinación de éstas. (Renom)

Además existe otra clasificación de acuerdo a la altura en la que se localizan y se dividen en cuatro Familias:

1. Altas
2. Medias
3. Bajas
4. Desarrollo vertical

Las tres primeras familias producen nubes sobre áreas extensas, se dispersan lentamente y se les conoce como estratiformes^{xi} a diferencia de las nubes de desarrollo vertical^{xii} que son nubes más compactas que cubren áreas más pequeñas y que tienen ascensos mayores a las tres primeras, se les conoce como nubes Cumuliformes^{xiii}.

Estas familias dan paso a 10 diferentes géneros, los cuales son mutuamente excluyentes, mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 3 Clasificación de la OMM (Renom)

FAMILIA	GÉNERO	SÍMBOLO	BASE (Media en m)
A (ALTAS).	Cirrus	Ci	5000-6000
	Cirrostratus	Cs	
	Cirrocumulus	Cc	
B (Medias)	Altostratus	As	2500-300
	Alto cumulus	Ac	
C(Bajas)	Stratus	St	1500-600
	Stratocumulus	Sc	600-1500
	Nimbostratus	Ns	100-600
D(Desarrollo Vertical)	Cumulus	Cu	300-2400
	Cumulonimbus	Cb	600-2400

Tabla 4 Tipos de Nubes.




NOMBRE	IMAGEN
<p>Ilustración 13 Cirrocumulos Las nubes altas se componen principalmente por hielo, la más común es "Cirrus".</p>	
<p>Ilustración 14 Alto cumulus Las nubes medias, están compuestas principalmente de gotas de agua y si la temperatura baja demasiado, estas gotas pueden congelarse.</p>	
<p>Ilustración 15 Altostratus Altostratus es otro ejemplo de nube media.</p>	

Ilustración 16 Stratus

Stratus es un tipo de nube baja, están formadas por gotas de agua, pero dependiendo de la zona geográfica y de la temperatura, estas gotas de agua pueden llegar a ser gotas de hielo o nieve.



Ilustración 17 Cumulonimbus

Las nubes con desarrollo vertical generalmente son Cumulos, su base generalmente es recta. Se desarrollan con mayor facilidad cuando las corrientes de aire son fuertes. La Cumulonimbus se considera como el máximo desarrollo de Cumulus, generalmente se asocia con tormentas. Es en esta nube dónde se producen los rayos.



Un mayor detalle de todas las definiciones de las diferentes clasificaciones de las nubes se encuentra en el “ANEXO I DEFINICIONES DE CLASIFICACIONES DE NUBES”.

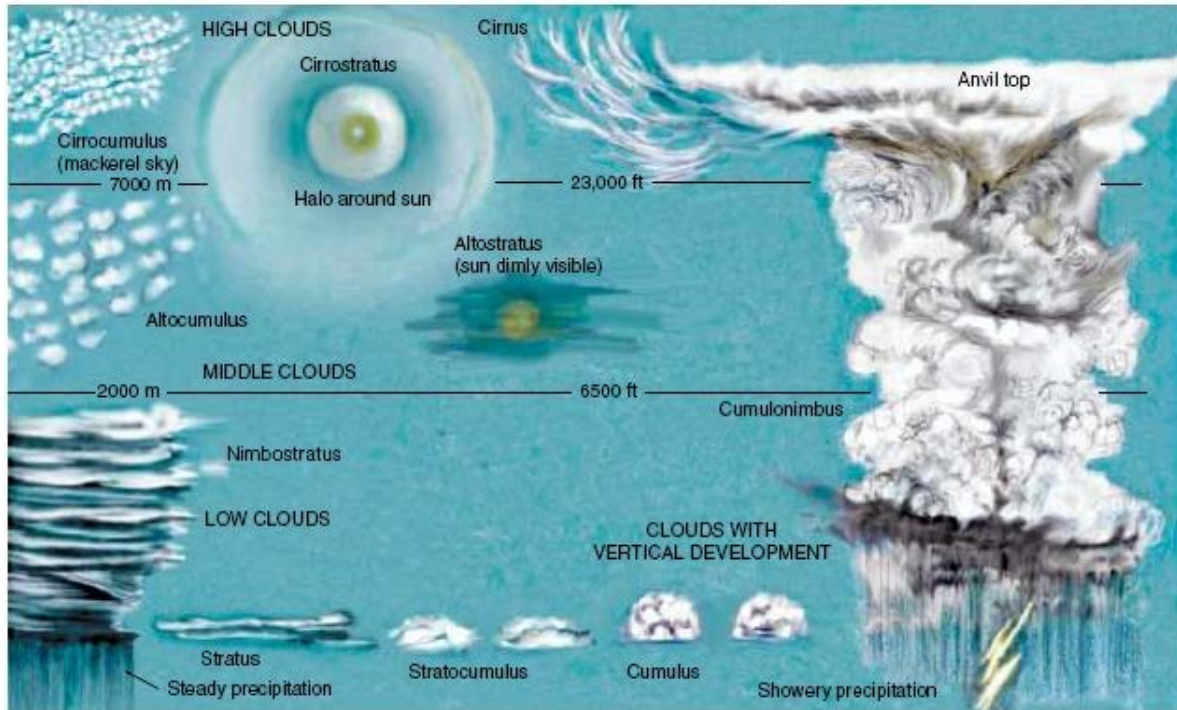


Ilustración 18 Formas típicas de nubes

A continuación se presentan algunas propiedades de acuerdo al tipo de nube, estos valores fueron tomados por un satélite de la NASA sobre Indonesia, Tailandia e Israel. En cirrus no hay radio de partícula porque el vapor de agua es mínimo, pues en su mayoría hay cristales de hielo.

Tabla 5 Valores Típicos de diferentes propiedades de las Nubes.

Entorno	Tipo de nube	Radio (μm)	Número de gotas/cm ³	Agua por nube (g/m ³)
Continental	Stratus	4.7	250	0.28
	Cumulus (Desarrollo)	4.8	400	0.26
	Cumulus (Disipandose)	3.5	1300	0.3
	Desarrollo Cumulonimbus	6-8	500	1-3
	Cumulunimbus disipandose	7-8	300	1-1.5
	Niebla	8.1	15	0.06
Marítimo	Stratus	6.7	80	0.3
	Cumulos	10.4	65	0.44
Marítimo/ Continental	Cirrus (-25°C)	No aplica	0.11	0.03
	Cirrus (-50°C)	No aplica	0.02	0.002

Otros autores también las clasifican por sus características físicas y dinámicas. Las cuales son:

- a) Escalas temporales de la nube: se refiere al tiempo de vida de la nube y tiempo que le toma a una parcela^{xiv} entrar a la nube y salir por su tope.
- b) Velocidades verticales.
- c) Contenidos de agua líquida.
- d) Temperatura de la nube.
- e) Turbulencia de la nube.

NUBES NOCTILUCENTES

Algunas personas han visto nubes como la de la Ilustración 19 y pareciera como “cosa de otro mundo”, sin embargo la explicación científica de este hecho la da James Russell de la Universidad de Hampton, principal investigador de la NASA de este fenómeno, él atribuye la coloración azul metálica, característico de estas nubes, al polvo de meteoro, que sirve como agente de nucleación en éstas nubes.

El crédito del descubrimiento de estas nubes se le da al alemán T. W. Backhouse, quién notó algo extraño en el cielo un atardecer dos años después de la erupción del volcán Krakatoa en 1885. La erupción del volcán ocasiono que sus cenizas se pudieran observar durante los atardeceres por varias partes del mundo, dicho fenómeno se convirtió en el pasatiempo de muchos, uno de ellos fue Backhouse, pero una tarde observo nubes con destellos azul metálico, la coloración de dichas nubes se le atribuyo a las cenizas del volcán, sin embargo, eventualmente, las cenizas del volcán desaparecieron y las nubes de coloración extraña seguían en el cielo. Este hecho causo el inicio de la investigación de “las nubes de coloración extraña”.



Ilustración 19 Nubes Noctulicentes desde Estocolmo, (Rosén, 2015)

El primero en encontrar la conexión entre el polvo de meteoro y las nubes fue Mark Hervig, usando el equipo *Solar Occultation for the Ice Experiment (SOFIE)* encontró que alrededor del 3% de los cristales de hielo en una nube noctilucente es polvo de meteoro.

Cada día cada cuerpo del sistema solar desprende partículas que en algún momento pueden chocar con la atmósfera terrestre, a pesar de que son incineradas al entrar en contacto con la atmósfera, dejan a su paso pequeñas cenizas a una altura de 83 km, que es la zona donde se aprecian las nubes notilicentes.

La formación de estas nubes es igual a la nucleación de nubes en la tropósfera, sin embargo lo curioso de este caso es que a estas alturas (87 km) resulta difícil que dos partículas de agua choquen entre si y formen gotas de agua, gracias al polvo de meteoro este proceso se da con mayor facilidad formando gotas de entre 20 y 70 nanómetros, recordemos que en las nubes cirrus son de 10 a 100 veces más grandes.

Por otro lado, en teoría, a altitudes más grandes de la atmósfera resultaría difícil encontrar vapor de agua para la formación de las nubes noctilucenes, el profesor Russell explica que dicha agua de las nubes noctilucenes proviene de la descomposición del gas metano (uno de los gases de efecto invernadero, que proviene, en su mayoría, de actividades humanas) a través de una serie de reacciones de oxidación complejas en presencia de la radiación solar. El metano es llevado a mayor altitud a través de las corrientes de aire ascendentes.

Si esta hipótesis es correcta, las nubes noctilucenes son una especie de “canario encerrado en una mina de carbón” por uno de los gases de efecto invernadero más importantes.

El Dr. Russell dice “las nubes noctilucenes podrán parecer alien, pero que nos dicen que algo importante está sucediendo en el planeta” (Phillips T. , 2015)

2.3.3 DATOS CURIOSOS

Durante el mes de Junio y el mes de Julio del 2013 en la Sources and Origins of Atmospheric Cloud Droplets experiment (SOACED) realizaron un experimento en la cima de una montaña ubicada en Swden. El principal objetivo de éste experimento fue caracterizar la física de las partículas y las propiedades químicas de la nube. Mayormente, el efecto que tienen los aerosoles y residuos en las nubes durante su formación, su crecimiento, el tiempo de vida y la velocidad con la que se genera precipitación. El primer efecto que encontraron fue que existe una intrínseca relación entre aumentar la concentración del aerosol y el tamaño de las gotas de agua de la nube. Sí aumenta la concentración de aerosol el tamaño de las gotas disminuye. Esta alteración en las gotas genera un aumento de tiempo de vida de la nube y aumenta la precipitación. A este fenómeno se le conoce como el segundo efecto (efecto de tiempo de vida).

Se piensa que ambos fenómenos tienen un papel importante en el clima, pero la magnitud de este papel es incierta, sin embargo el conocer este tipo de efectos puede ayudar a predecir el futuro del clima de la Tierra.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN DE LA CÁMARA DE NIEBLA

"Los analfabetas del siglo XXI no serán aquellos que no sepan leer ni escribir, sino aquellos que no sepan aprender, desaprender y reaprender."

Alvin Toffler

3.1 PRUEBAS EN LABORATORIO

Con la finalidad de establecer parámetros iniciales para la formación de las nubes se realizaron pruebas en laboratorio. Por teoría sabemos que las nubes se forman a partir de corrientes de aire (principalmente ascendentes y descendentes), sobresaturación de vapor de agua de la estratósfera, temperaturas entre -50°C y 10°C (que son temperaturas de la estratósfera, donde se forman las nubes) y núcleos de condensación (aerosoles). A partir de estos parámetros se diseñó un experimento de laboratorio que se describirá a continuación (Ilustración 20).

1. Se llevaron a punto de ebullición 200 ml de agua en un matraz de 500 ml conectado a un sistema cerrado, en el cual se colocó un segundo matraz, dónde se formará la nube.
2. El vapor de agua será pasada por una manguera al segundo matraz, que estará vacío. Como en éste se formará la nube de preferencia tendrá que ser un matraz que resista el cambio brusco de temperatura de caliente a frío.
3. El nitrógeno entra por una segunda boca del matraz a través de una segunda manguera.
4. Al segundo matraz, por la boca principal, se le agregan nano partículas de carbón que servirán como los núcleos de condensación.

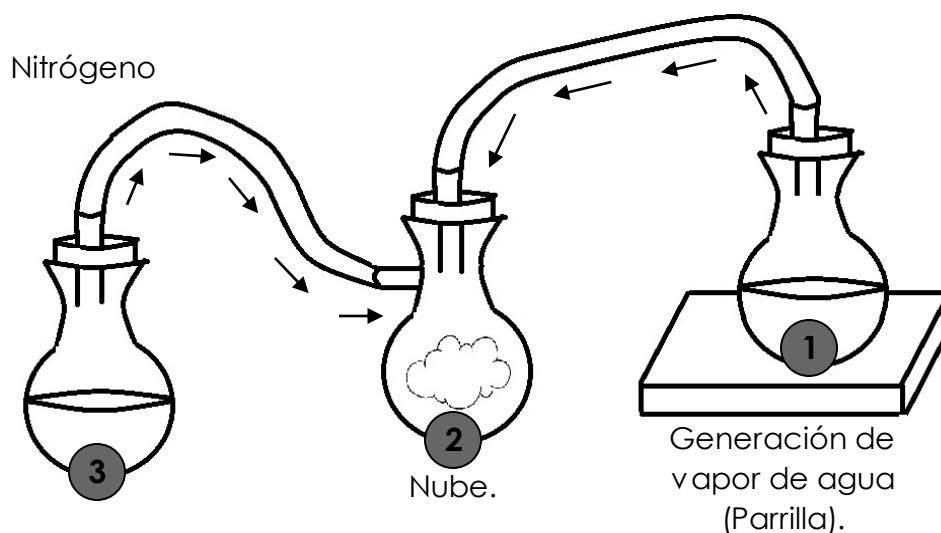


Ilustración 20 Diagrama de la prueba.

De estas pruebas se observó lo siguiente:

- La nube se formó con los materiales propuestos originalmente.
- Las condiciones del vapor de agua bajo las que se llevó a cabo el experimento fueron suficientes para la formación de la nube: temperatura de ebullición y presión atmosférica, de la Ciudad de México, lo cual equivale a 95°C y 585 mmHg.
- Las tuberías de alimentación sufrieron un bloqueo, debido a que el nitrógeno líquido tiende a descender en una atmósfera aérea, este puede solidificar el agua en las tuberías inferiores, obstruyéndolas. Para evitar este problema se consideró colocar válvulas check tanto en las tuberías de nitrógeno líquido así como en las de agua.
- Debido a que no se adicionaron nucleófilos dentro del matraz, la nube sólo se mantuvo durante pocos segundos, por lo tanto es necesario suministrar continuamente Nitrógeno y vapor de agua durante la formación de la nube.



Ilustración 21 Pruebas de laboratorio

- Para evitar la condensación del vapor de agua en las paredes del matraz fue necesario poner un tensoactivo comercial.
- Las nanopartículas ayudan a mantener la nube durante más tiempo, en un matraz de 500 mL, aproximadamente 10 segundos más que sin las nanopartículas, estas tienen que ser suministradas desde arriba.
- También debe considerarse el hecho de que el vidrio no resiste cambios bruscos de temperatura, por lo cual no podemos elevar repentinamente la

temperatura del agua (en más de 100 °C), ni inyectar súbitamente el Nitrógeno.

3.2 ANÁLISIS DEL SISTEMA

El diseño de la cámara de niebla requiere que se reproduzcan, las veces que sean necesarias, las condiciones mínimas para que se forme la nube y poder mantenerla al menos 20 minutos, de acuerdo a lo que el director del proyecto requiere para la escenografía, por ello necesitamos flujos continuos de una fuente de vapor de agua, de corrientes de aire y de elementos que sirvan para bajar la temperatura del ambiente y que simule los aerosoles de la atmósfera.

Para el vapor de agua se propone colocar un hervidor que funcione con resistencias eléctricas, que genere vapor de agua constantemente y que se ubique fuera de la cámara de niebla, esto último con la finalidad de que el interior de la cámara de niebla únicamente se utilice para la formación de la nube.

En el caso de las corrientes de aire se propone usar un compresor conectado a mangueras de plástico transparente (esto último por estética) que a su vez se conecten al interior de la cámara de niebla.

Se requiere bajar a temperatura ambiente de la cámara por debajo de los 0°C. Para ello se propone usar nitrógeno líquido, éste se encuentra a una temperatura de alrededor -180°C.

Finalmente para los núcleos de condensación se usaran nano partículas de carbón, pues la mayoría de los aerosoles en la atmósfera son a base de carbón. Estas nano partículas de carbón fueron elaborados por el I.Q. Rodrigo Buentello Martínez.

3.3 DISEÑO DE LA CÁMARA A ESCALA

Para que el público pueda ver lo que sucede dentro de la escala se requiere que las paredes sean de vidrio; recordemos que para evitar la condensación del vapor de agua en las paredes éstas se recubrieron con tensoactivo comercial.

El tanque de nitrógeno y el hervidor se ubicaron fuera de la cámara, por tal motivo se necesitarán tubos de acero inoxidable o cobre (por su resistencia al cambio brusco de temperatura) con aislante térmico (evita pérdidas de calor) que conecten los respectivos tanques con la cámara y que, además, tengan salida en la parte central de la cámara, esto último con el objetivo de para que las corrientes se encuentren fácilmente.

Las condiciones de la corriente de vapor de agua de entrada variaban entre una temperatura de 100 y 150 °C y una presión de 40 a 70 psi, mientras que las condiciones de la corriente de nitrógeno tenía una temperatura alrededor de -180°C y una presión entre 7 y 10 psi.

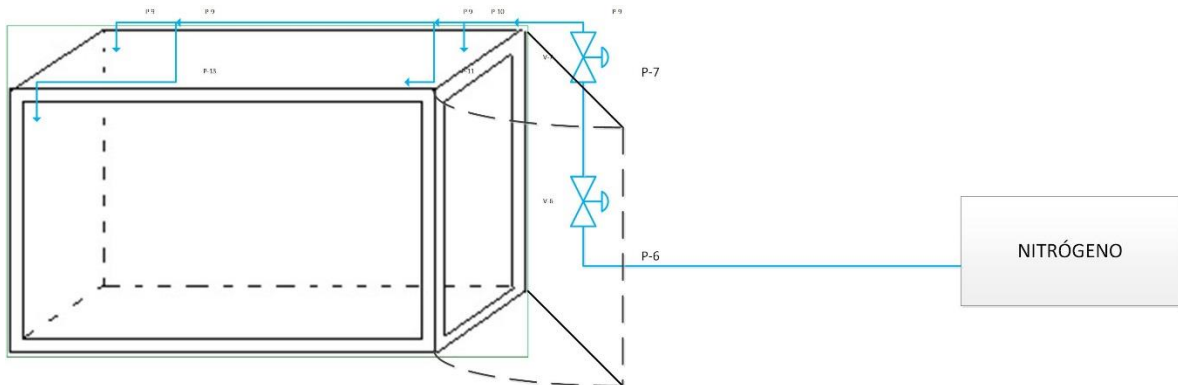


Ilustración 22 DTI Nitrógeno

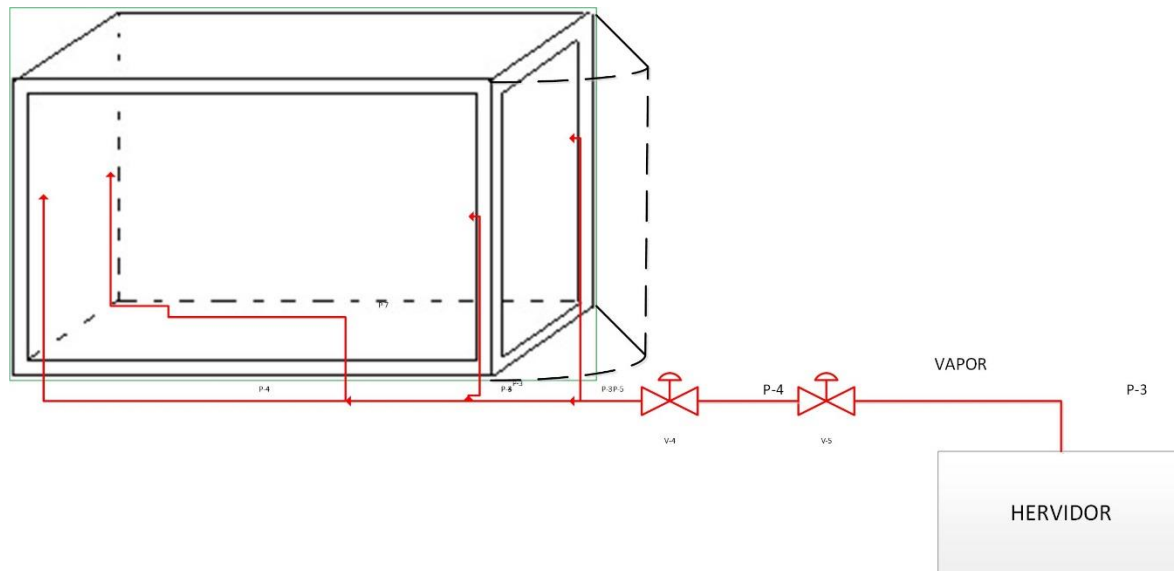


Ilustración 23 DTI Vapor de Agua

La disposición de las mangueras de aire que se conectan al compresor, deben de ser alrededor de la parte media interna de la cámara de forma vertical y horizontal con el propósito de generar corrientes de aire en diferentes direcciones en el interior de la cámara. Así mismo se propone que el flujo de aire de las mangueras vertical y horizontal sean independientes respectivamente, con el objeto de que se puedan operar independientemente, es decir, que los flujos de aire puedan ser diferentes entre ellos con el objetivo de generar corrientes de choque. Por otro lado, para que las corrientes de aire que se generen tengan la dirección deseada se perforaron las mangueras a lo largo de las líneas que se encuentran dentro de la cámara de niebla.

En dichas líneas de aire, ubicadas dentro de la cámara, se colocaron pequeñas cajas que contengan las nanopartículas, con el fin de que las corrientes de aire arrastren las nanopartículas al interior de la cámara.

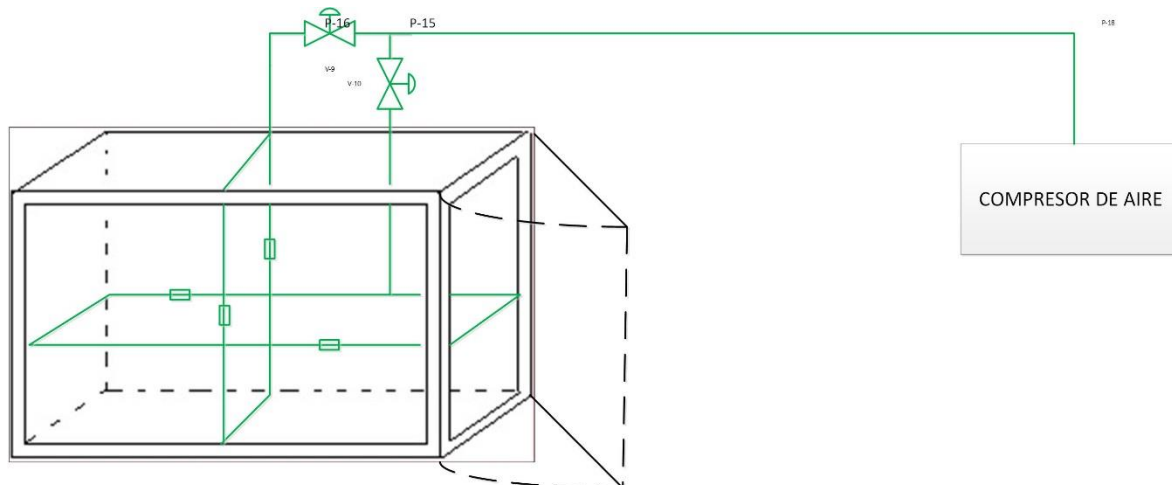


Ilustración 24 DTI Aire

La cámara se desaloja por medio de una puerta que se encuentra en un costado de ésta y que además sirve para controlar la humedad dentro de la misma.

Con el principal objetivo de minimizar costos, ya que el presupuesto para la elaboración del proyecto es limitado, se utilizaron equipos comerciales² que propiciaran las condiciones mínimas para la formación de la nube dentro de la cámara, además las medias de esta fueron dependientes de las necesidades de la Producción, es por eso que las medidas que se presentan a continuación están en función de las medidas comerciales de las paredes de vidrio templado de la cámara.

² Estos equipos reales se muestran en el *Anexo II La escala y sus Equipos..*

3.4 DIAGRAMAS DEL ESCALA

3.4.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO.

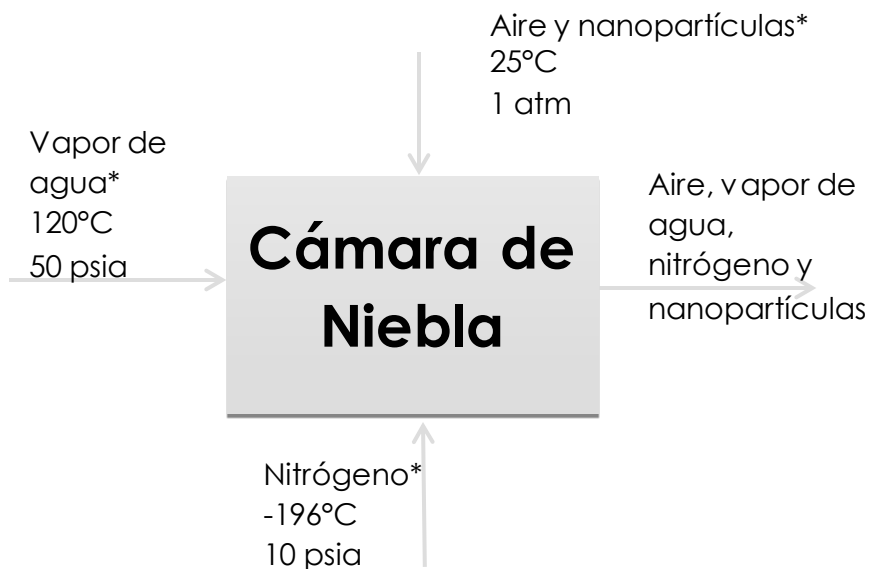


Ilustración 25 DFP del proceso.

³ *Los datos del DFP son obtenidos a partir de las pruebas experimentales, serán mostrados a detalle en el siguiente capítulo.

3.4.2 DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN DEL PROCESO

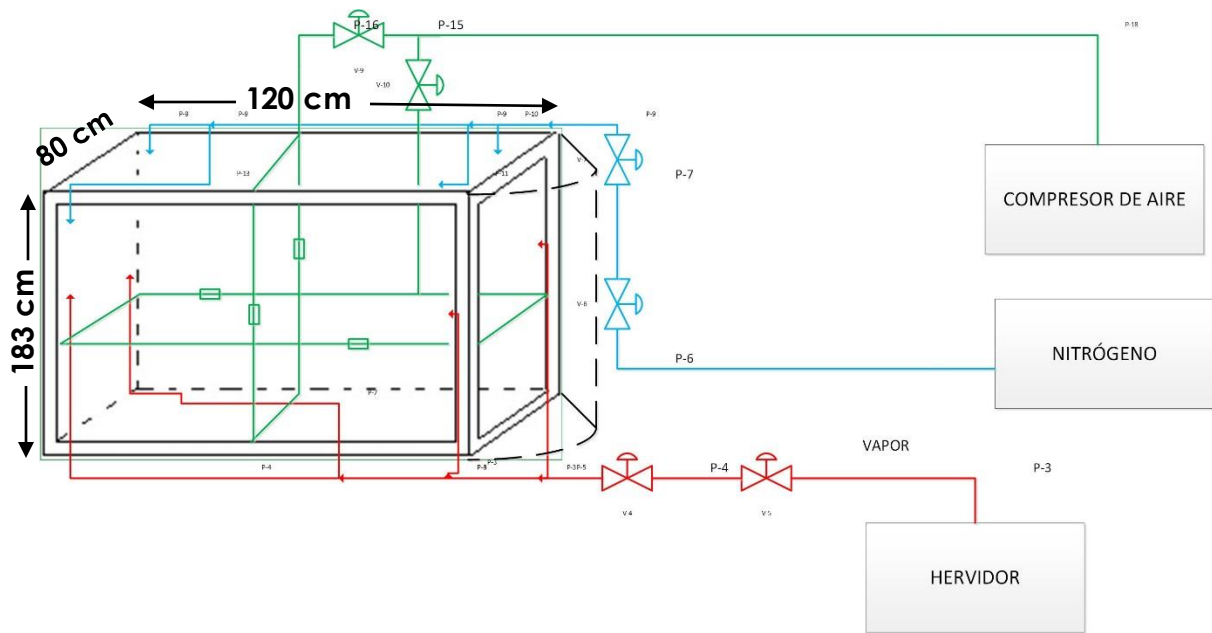


Ilustración 26 DTI del proceso.

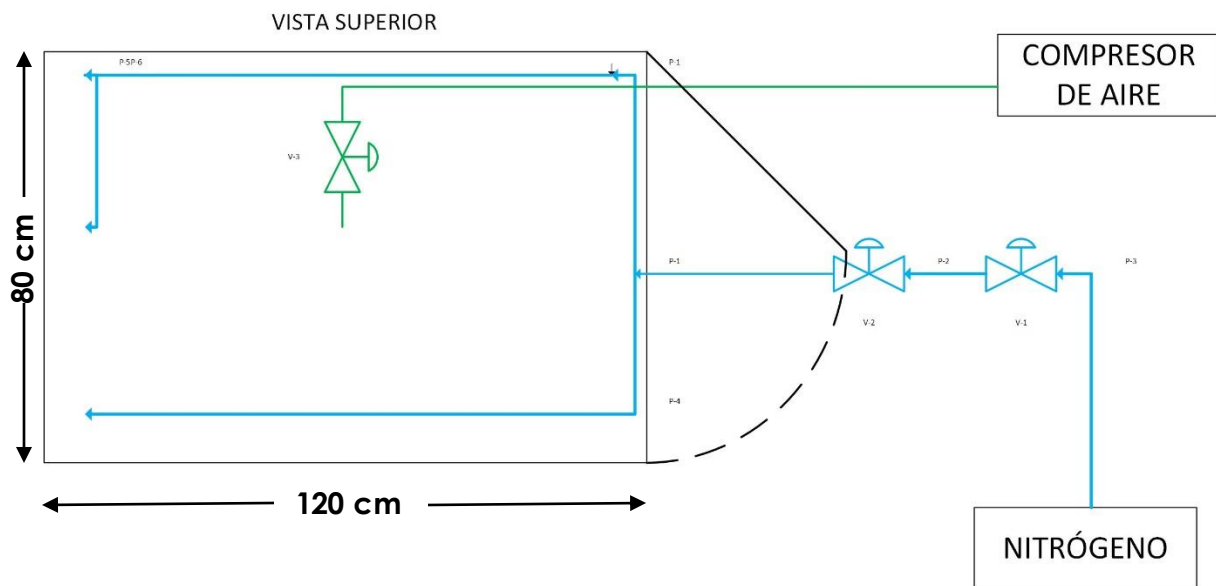


Ilustración 27 DTI del proceso, vista superior.

3.4.3 DISEÑO DE INTEGRACIÓN VISUAL DE LA ESCALA

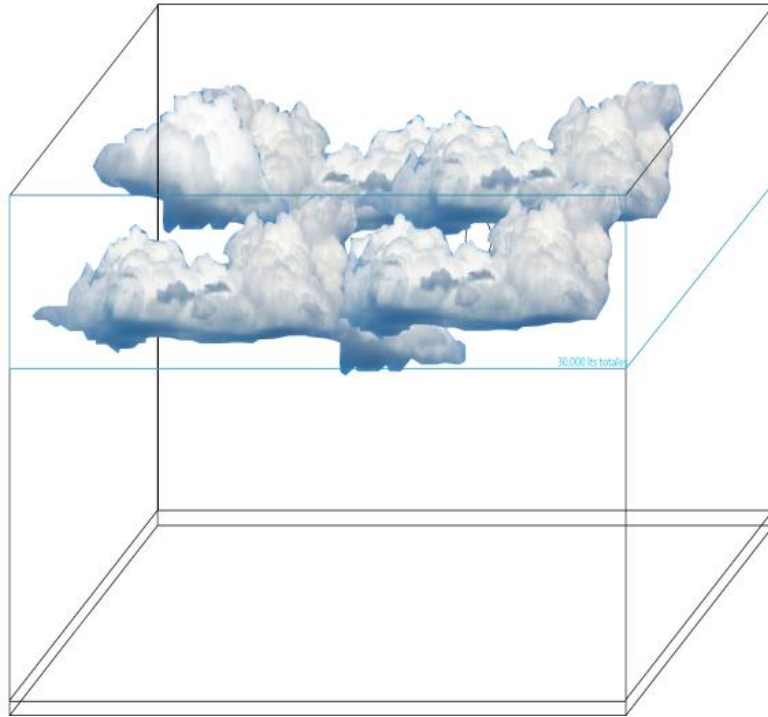


Ilustración 28 Integración visual de la escala

CAPÍTULO 4

4. FORMANDO UNA NUBE

"No me importa lo que haces para ganarte la vida. Quiero saber lo que ansías – y si te atreves a soñar con lograr lo que tu corazón desea. No me interesa la edad que tengas. Quiero saber si vas a correr el riesgo de quedar como un tono – por amor – por tus sueños – por la aventura de estar vivo".

Oriah Mountain Dreamer

Las pruebas de laboratorio facilitaron el inicio de las pruebas en la escala, debido a que se obtuvo información acerca del fenómeno. Varias de las observaciones hechas, descritas en el Capítulo 3, no se reprodujeron de la misma forma que en el laboratorio, esto podría deberse a que con corrientes de aire en diversos puntos de la escala se permitió una formación diversificada de nubes, sin embargo, en el presente trabajo sólo nos enfocaremos al estudio de dos tipos de nubes.

4.1 PRUEBAS EN LA ESCALA DE LA CÁMARA

De las diversas pruebas de la escala el punto más importante es el cálculo de la proporción entre el nitrógeno líquido y el vapor de agua para crear las condiciones necesarias con el objeto de lograr el efecto visual de una nube.

Después de varias pruebas se podemos describir las siguientes observaciones:

1. Es preferible generar los niveles máximos de presión y temperatura en el vapor que permita generar el hervidor y suministrarlo constantemente. Simultáneamente se comienza a suministrar una corriente pequeña de nitrógeno (las cantidades suministradas se muestran más adelante del presente capítulo.)
2. No debemos olvidar las corrientes de aire: para que la nube pueda ser dinámica y rotar es necesario variar las corrientes de aire de las líneas verticales y horizontales de forma independiente, además de abrir la puerta y colocar un ventilador en la parte inferior con la finalidad de despejar de forma más rápida la cámara de niebla y formar otro tipo de nube (durante la función el tiempo de desalojo debe ser el menor posible.)
3. Las cajas de las nanopartículas son cargadas antes el inicio del evento, para una duración de 20 min, las cajas sólo requerían ser cargadas con una cucharada de nanopartículas (aproximadamente 20 mg).
4. Durante la formación de cada una de los tipos de nubes se deberán mantener los flujos de aire, de vapor de agua y de nitrógeno lo más constantes posibles, una vez alcanzadas las características de la nube deseada.

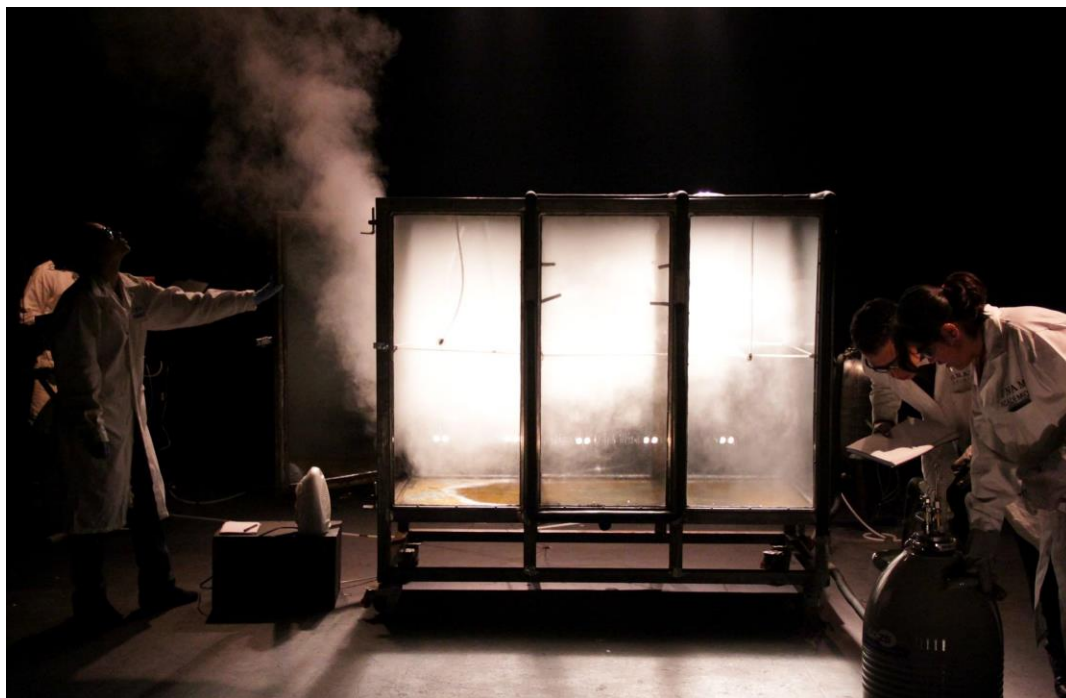


Ilustración 29 Nube en el Escala

4.1.1 PREPARACIÓN DE LA ESCALA PARA SU USO

Antes de describir a detalle el proceso formación de la nube, es necesario exponer las condiciones iniciales de la cámara y los equipos.

1. Se conectan las líneas de suministro de aire a la cámara y al compresor.
2. El tanque de nitrógeno deberá contener al menos 14 kg y se deberá conectar a la línea de suministro.
3. Verificar que el hervidor contenga por lo menos 20 l de agua (15 l es la cantidad mínima que se necesita para que las resistencias se encuentren sumergidas totalmente y evitar así daño en ellas). Cada formación de nube requiere al menos 2 l de agua para que se formen alrededor de 20 min, sin embargo se llena así para poder generar la mayor cantidad de vapor, considerando que su generación también va en función del espacio disponible dentro del hervidor. Una vez lleno el hervidor, se conecta a corriente y se desconecta una vez que la presión ha alcanzado los 70 psi, por último se conecta el hervidor a la escala.

4. Este paso se puede realizar mientras el hervidor genera vapor. En una cubeta se vierten 5 l de agua de la llave y se le agregan 3 ml de tensoactivo comercial, se mezcla hasta disolver éste en su totalidad y posteriormente se procede a recubrir todas las paredes internas de la escala con el tensoactivo.
5. Se colocan nanopartículas de carbón en las cajitas contenedoras de las mangueras. Una cucharada, al redor de 20 mg.

4.2 DATOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los datos experimentales tomados al descargar el vapor de agua y el nitrógeno líquido a la cámara de niebla. Cabe destacar que cada prueba se realizó bajo condiciones diferentes, las cuales se mencionan a continuación:

- Cámara: cerrada o abierta
- Apertura de la válvula del hervidor: diferentes flujos
- Corrientes de aire: aperturas diferentes (0 a 100 %) en una o ambas líneas.

Cada prueba se inició cuando se obtuvieron las condiciones de presión de vapor requeridas en el hervidor (lo cual se estableció como mínimo en 50 psi) y se concluyó cuando ésta fue menor a 5 psi (por debajo de ésta condición la calidad y el flujo de vapor que se inyecta es insuficiente).

Todas las pruebas con excepción de la número 7 se realizaron con el hervidor apagado, en la prueba 7 se reconectó el hervidor cuando la presión bajó a 40 psi.

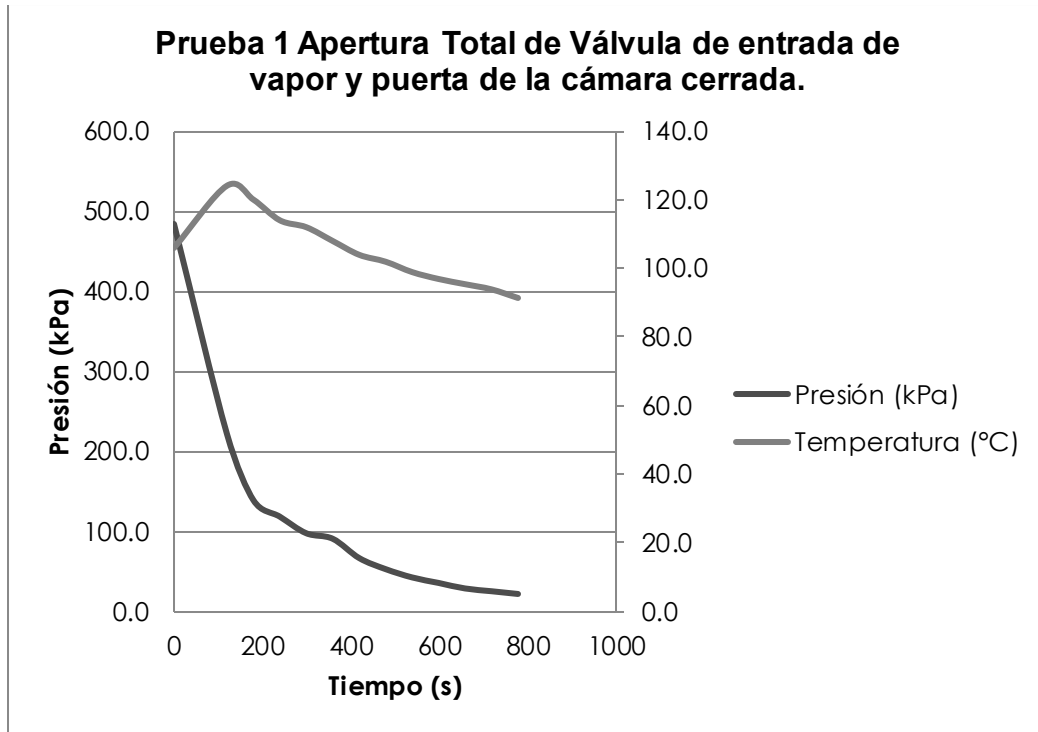
En cuanto a las condiciones de Nitrógeno: la masa gastada varió entre los 9 Kg y 10 Kg con un flujo constante, dicho flujo es dependiente del tipo de experimento y nube que requirió formar. Debido a que no se contaba con un medidor de flujo se midió la cantidad de masa gastada y el tiempo en que se permitió el flujo de vapor para obtener el flujo aproximado con el que se trabajó.

En los casos siguientes observamos los datos obtenidos a diferentes condiciones de temperatura y presión de vapor de agua inicial.

Tabla 6 Prueba 1.

**Prueba 1 a Apertura Total de Válvula de entrada
de vapor y puerta de la cámara cerrada.**

V_{inicial}	18 l		
V_{final}	15 l		
Tiempo (s)	Presión (Psi)	Presión (kPa)	Temperatura (°C)
0	70.0	482.6	106.0
120	32.0	220.6	124.0
180	20.0	137.9	120.0
240	17.0	117.2	114.0
300	14.0	96.5	112.0
360	13.0	89.6	108.0
420	9.5	65.5	104.0
480	7.5	51.7	102.0
540	6.0	41.4	99.0
600	5.0	34.5	97.0
660	4.0	27.6	95.5
720	3.5	24.1	94.0
780	3.0	20.7	91.5



Gráfica 1 Prueba 1 Apertura Total de la Válvula de entrada.

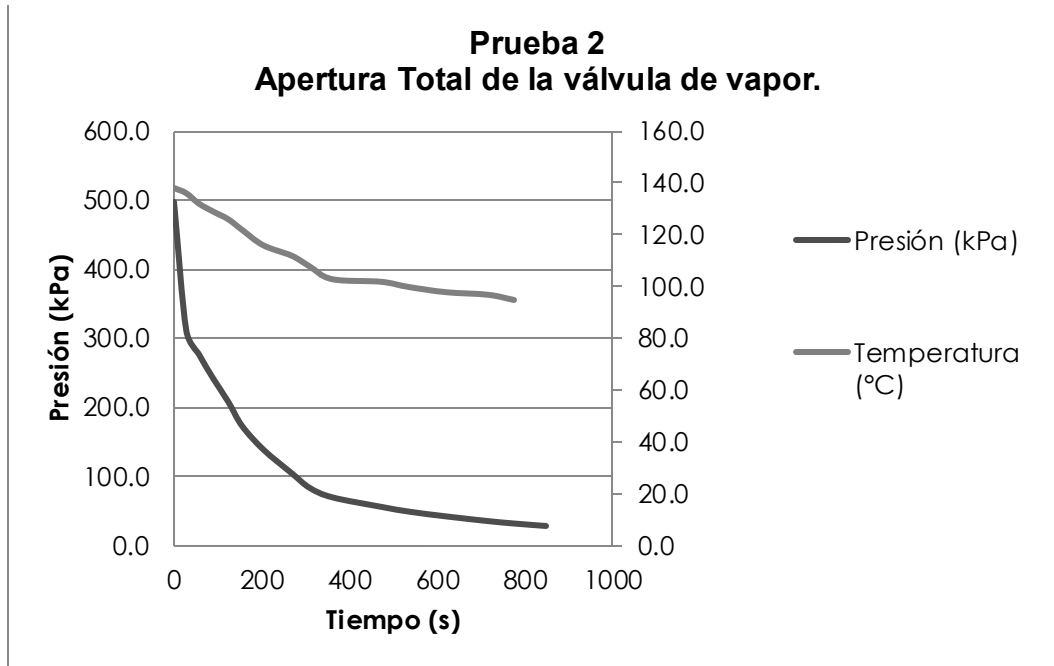
En el gráfico *Prueba 1* observamos el comportamiento de la presión y temperatura de vapor de agua a lo largo de 12 minutos de descarga del hervidor. La prueba se realizó bajo las siguientes condiciones: el hervidor apagado y una vez que se llevó el vapor a la calidad deseada se interrumpió el calentamiento; desde este punto se inició el registro de las lecturas de presión, temperatura a un tiempo dado.

El fenómeno de disminución de presión y enfriamiento dentro del hervidor se observó sin proporcionar más energía al sistema, por lo cual apreciamos la disminución de la temperatura y la presión conforme el vapor de agua va abandonando el hervidor obteniendo la curva de vapor del proceso.

Tabla 7 Prueba 2.

Prueba 2 Apertura Total de la válvula de vapor.

V_{inicial}	40 l		
V_{final}	38 l		
Tiempo (s)	Presión (Psi)	Presión (kPa)	Temperatura (°C)
0	72.0	496.4	106.0
28	45.0	310.3	138.0
57	40.0	275.8	136.0
89	35.0	241.3	132.0
124	30.0	206.8	129.0
155	25.0	172.4	126.0
204	20.0	137.9	122.0
269	15.0	103.4	116.0
309	12.0	82.7	112.0
361	10.0	68.9	108.0
473	8.0	55.2	103.0
536	7.0	48.3	102.0
621	6.0	41.4	100.0
718	5.0	34.5	98.0
777	4.5	31.0	97.0
847	4.0	27.6	95.0



Grafica 2 Prueba 2.

La *Prueba 2* se realizó bajo las mismas condiciones que la *Prueba 1*, estos datos junto con los obtenidos en la *Prueba 1* serán considerados para realizar más adelante el balance de materia y energía.

La duración de la prueba fue de 14.11 min.

En el gráfico anterior observamos el mismo comportamiento que en la *Prueba 1* y se puede decir que los datos obtenidos son confiables y el comportamiento es regular y reproducible siempre y cuando el experimento tenga las mismas características.

Tabla 8 Prueba 3.

Prueba 3 Apertura Total de la válvula de vapor.

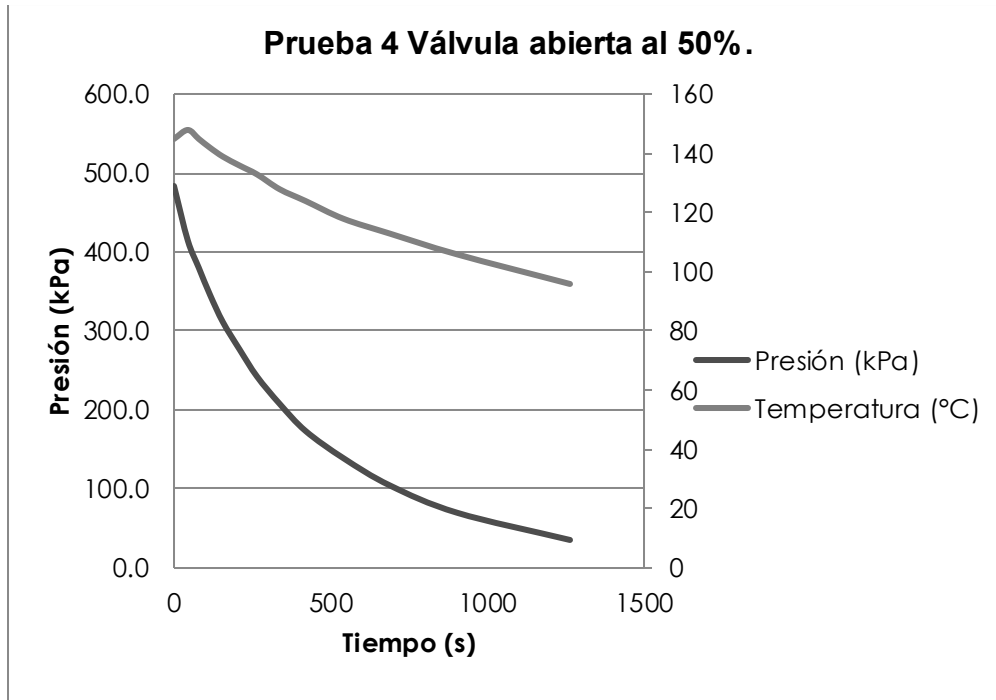
V_{inicial}	24 l		
V_{final}	23 l		
Tiempo (s)	Presión (Psi)	Presión (kPa)	Temperatura (°C)
	55	379.2	120
	50	344.7	140
	45	310.3	138
	40	275.8	136
	35	241.3	134
	30	206.8	132
	25	172.4	126
	20	137.9	123
	15	103.4	118
	10	68.9	113
	8	55.2	110
	6	41.4	107
	5	34.5	102
	4	27.6	99
	3	20.7	96
	2.5	17.2	94

En esta prueba observamos un error experimental, debido a que no se tomó el tiempo, por ello, aunque esta prueba fue hecha bajo las mismas condiciones que las *pruebas 1 y 2*, no se toma en cuenta para los cálculos, sin embargo, se considera esencial agregarla al trabajo escrito porque forma parte de las pruebas, además de que se observa que la presión y la temperatura disminuyen proporcionalmente, como lo hacen en las *pruebas 1 y 2*.

Tabla 9 Prueba 4.

Prueba 4 Válvula abierta al 50%.

V_{inicial}	23 l		
V_{final}	21 l		
Tiempo (s)	Presión (Psi)	Presión (kPa)	Temperatura (°C)
0	70	482.6	145
44	60	413.7	148
79	55	379.2	145
115	50	344.7	142
156	45	310.3	139
209	40	275.8	136
265	35	241.3	133
337	30	206.8	128
420	25	172.4	124
541	20	137.9	118
689	15	103.4	113
903	10	68.9	106
1263	5	34.5	96



Grafica 3 Prueba 4.

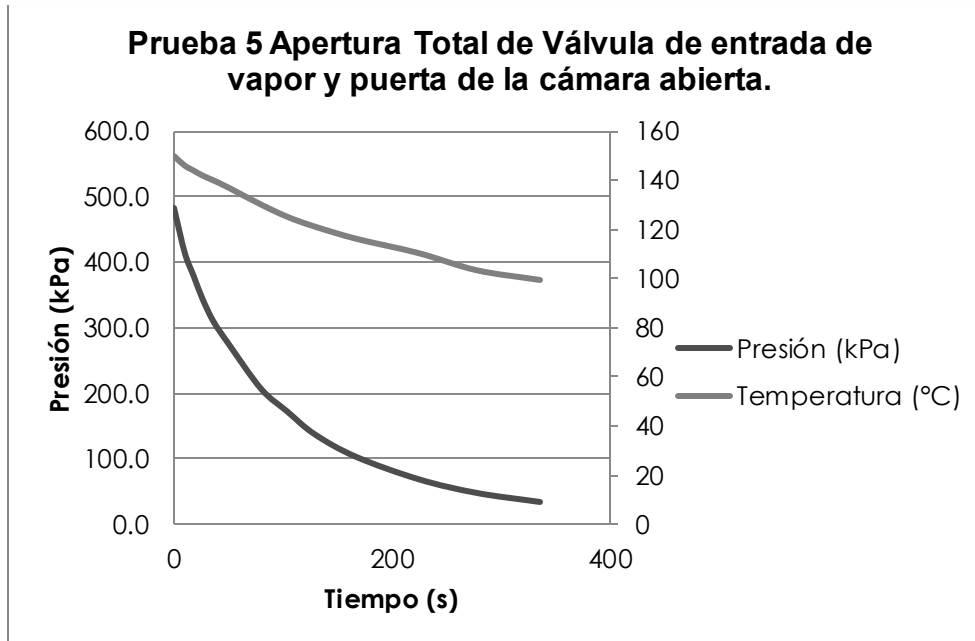
Dentro de las primeras diferencias se pueden observar respecto a las anteriores pruebas son: el tiempo y la duración de descarga de vapor (que en este caso fue mayor). Algo que podemos apreciar es que después de que la válvula se abre, la temperatura aumenta y desde ese punto comienza el descenso de la temperatura, esto se debe a que la presión del vapor disminuye y se puede deducir que el movimiento de las partículas es mayor, aumenta su energía cinética y esto se ve reflejado en el aumento de la temperatura, este “golpe de ariete” también lo podemos apreciar en la Prueba 1.

A partir de la prueba 4 existen variaciones para las condiciones bajo las que se realizan las pruebas, en este caso la apertura de la válvula fue de 50%. La duración de la prueba fue de 21.05 min.

Tabla 10 Prueba 5.

**Prueba 5 Apertura Total de Válvula de entrada
de vapor y puerta de la cámara abierta.**

V_{inicial}	21 l		
V_{final}	19 l		
Tiempo (s)	Presión (Psi)	Presión (kPa)	Temperatura (°C)
0	70	482.6	150
10	60	413.7	146
18	55	379.2	144
26	50	344.7	142
36	45	310.3	140
50	40	275.8	137
80	30	206.8	130
104	25	172.4	125
129	20	137.9	121
167	15	103.4	116
225	10	68.9	110
278	7	48.3	103
336	5	34.5	99



Grafica 4 Prueba 5 Apertura Total de Válvula de entrada de vapor y puerta de la cámara abierta.

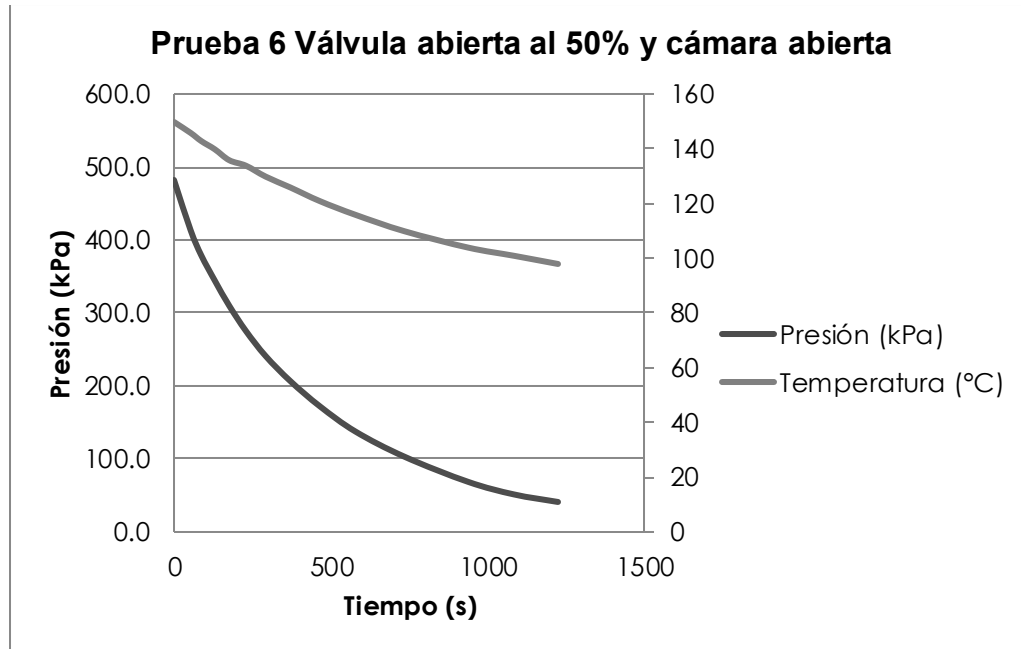
La *Prueba 5* fue realizada bajo las siguientes condiciones: cámara abierta y válvula totalmente abierta. La duración de la prueba: 5.6 min.

En la prueba 5 podemos apreciar que la tendencia es parecida a las pruebas anteriores, sin embargo el tiempo que tarda en desalojarse el hervidor de vapor es aproximadamente la mitad del tiempo que el de las *prueba 1 y 2*.

Tabla 11 Prueba 6.

**Prueba 6 Válvula abierta al 50% y cámara
abierta.**

V_{inicial}	19 l		
V_{final}	17 l		
Tiempo (s)	Presión (Psi)	Presión (kPa)	Temperatura (°C)
0	70	482.6	150
53	60	413.7	146
87	55	379.2	143
130	50	344.7	140
176	45	310.3	136
229	40	275.8	134
292	35	241.3	130
371	30	206.8	126
465	25	172.4	121
578	20	137.9	116
734	15	103.4	110
937	10	68.9	104
1083	7.5	51.7	101
1223	6	41.4	98



Gráfica 5 Válvula abierta al 50% cámara abierta.

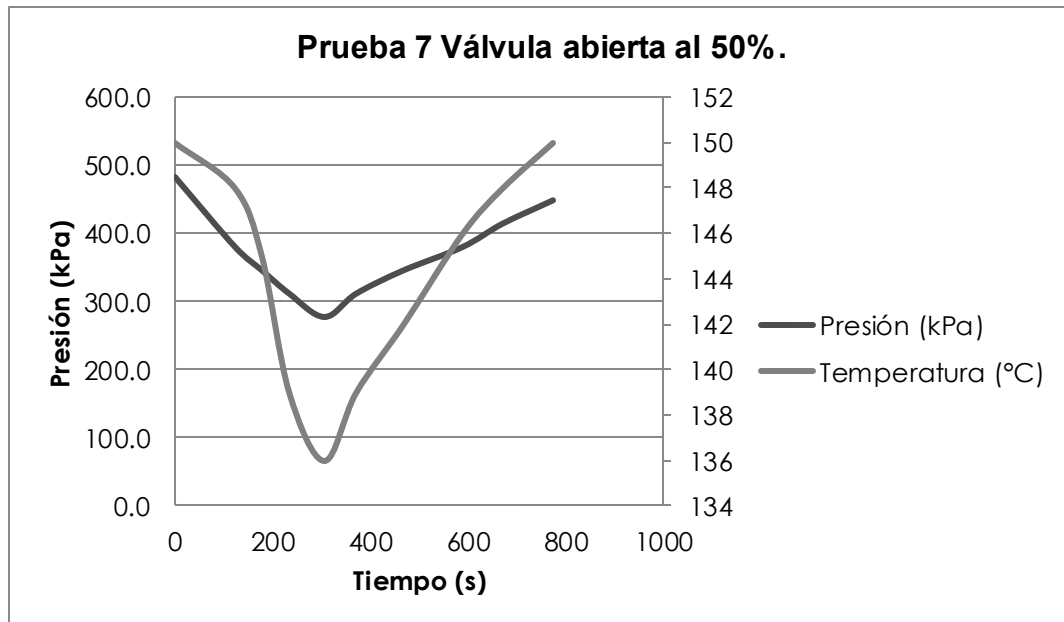
Esta prueba fue realizada bajo condiciones: cámara abierta y apertura de válvula a 50%. La duración de la prueba fue de 20.38 min.

Se obtuvo una gráfica suave, por lo que se puede atribuir a que tenemos una mayor cantidad de vapor debido a la realización de la corrida después de que el contenido del hervidor se hubo precalentado, por ello alcanzamos mayores temperaturas. Además la duración de esta prueba fue superior a las anteriores, la apertura de la válvula a la mitad de su capacidad, ya sea que se encuentre cerrada o abierta la cámara no impacta mucho en la variación de la duración de la emisión del vapor útil.

Tabla 12 Prueba 7.

Prueba 7 Válvula abierta al 50%.

V_{inicial}	24 l		
V_{final}	22 l		
Tiempo (s)	Presión (Psi)	Presión (kPa)	Temperatura (°C)
0	70	482.6	150
123	55	379.2	148
178	50	344.7	145
234	45	310.3	139
306	40	275.8	136
371	45	310.3	139
468	50	344.7	142
589	55	379.2	146
671	60	413.7	148
774	65	448.2	150



Grafica 6 Válvula abierta al 50%.

En éste caso los datos en color rojo indican que la medición se realizó con el hervidor reconectado, se aprecia claramente la diferencia numérica pues tanto la presión como la temperatura comienzan nuevamente a incrementar su valor.

La corrida se realizó bajo las mismas condiciones que la *Prueba 4*: cámara cerrada y válvula a 50% de apertura. La duración fue de 12.9 min y se conectó el hervidor al minuto 5.1.

En la gráfica se puede apreciar claramente el momento de reconexión del hervidor, los datos de esta prueba, hasta antes de la reconexión, junto con la *Prueba 4* serán utilizados para los posteriores cálculos del balance de materia y energía.

Esta prueba nos demuestra que es posible reconectar el hervidor durante el evento para aumentar el tiempo de emisión de vapor a lo largo de las pruebas. Por otro lado, los tiempos de duración de cada prueba varían, respecto a la apertura de la puerta y de la válvula, con lo cual se logra formar la nube durante los 20 minutos, lo deseable es tener la válvula con una apertura del 50%, de acuerdo a estas pruebas, sin embargo, si la apertura es total, es posible reconectar el hervidor al llegar a las 40 psi, aproximadamente, siempre y cuando tenga un nivel de agua suficiente para continuar evaporando el agua.

CAPÍTULO 5

5. CALCULANDO UNA NUBE

"Mi doctrina es: vive de tal modo que llegues a desear vivir otra vez, éste es tu deber, ¡porque revivirás de todas formas!"

Nietzsche

5.1 CASOS DE ESTUDIO

Conforme se realizaron las diversas pruebas en la escala, se fueron dominando y visualizando la formación de dos nubes diferentes, las cuales fueron realizadas bajo parámetros experimentales diferentes:

1. Cámara cerrada, apertura total de la válvula del hervidor (Pruebas 1 y 2).
El flujo de Nitrógeno es constante y la masa total empleada en cada prueba fue de 10 kg, este flujo se mantuvo constante durante 20 min.
2. Cámara abierta y apertura al 50% de la válvula de salida del hervidor (Pruebas 4 y 7).
El flujo de Nitrógeno líquido, al igual que en el caso 1 es constante, con tiempo de operación de 20 min, sin embargo la masa de nitrógeno empleada fue de 9 kg.

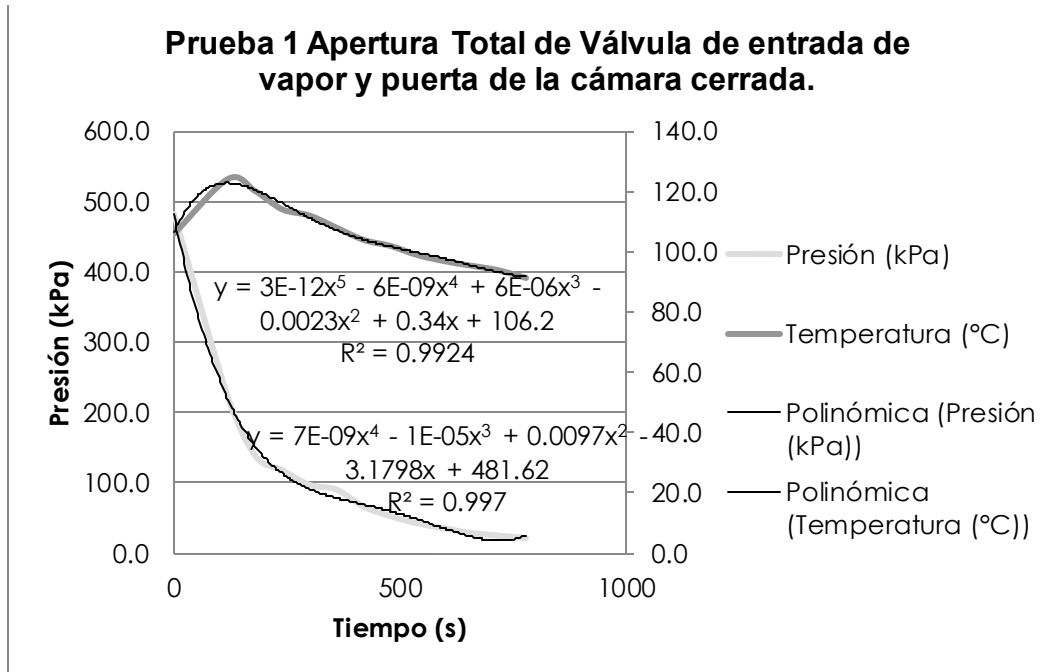
Para el Balance de Materia y Energía de ambos casos se consideró que el choque de temperaturas entre el vapor y el nitrógeno es inmediato.

A continuación se explicara la memoria de cálculo del caso 1 y también se mostrarán los datos de la nube 1 y 2. La memoria de cálculo es similar en ambos casos.

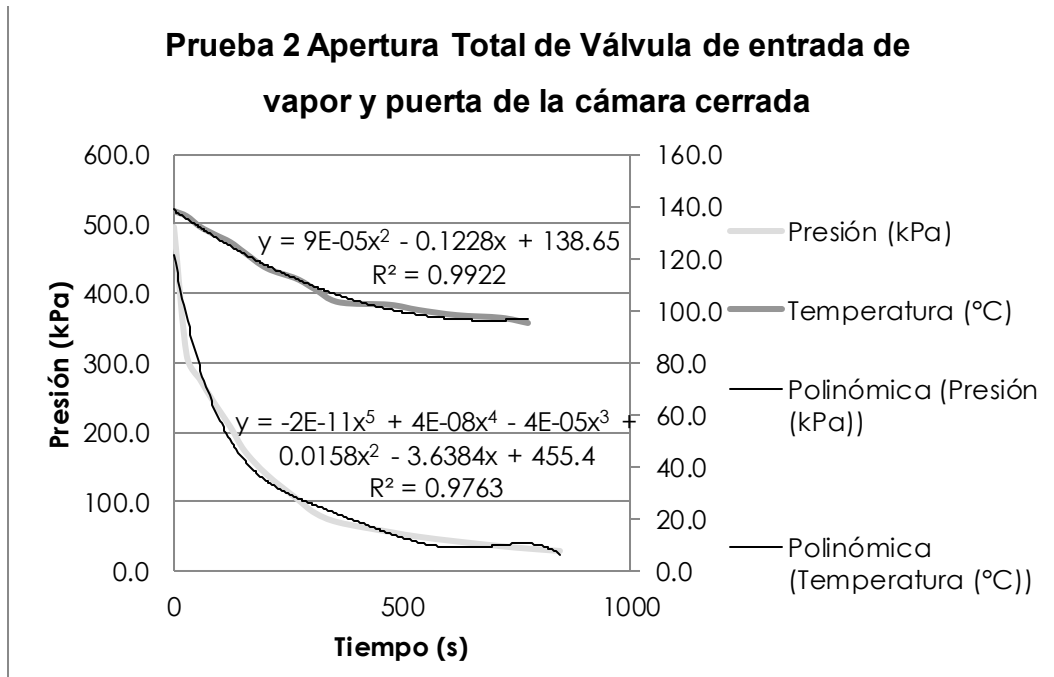
5.1.1 NUBE 1

El ejemplo siguiente, que en éste caso llamamos “Nube 1” se obtuvo bajo los siguientes lineamientos:

1. Se seleccionó la temperatura más alta a la que cada prueba llegó, para la prueba 1 fue de 124°C y para la prueba 2 fue de 138°C, de éstas se utilizó la menor para los cálculos que se observarán adelante.
2. A partir del tiempo que tardó en alcanzar el vapor los 124°C en la prueba 1, se hizo una regresión lineal de la gráfica de la prueba 2 y se obtuvo el valor de la presión y de la temperatura en ese mismo intervalo de tiempo. La variable que se toma como independiente es el tiempo.



Grafica 7 Prueba 1 Apertura Total de Válvula de entrada de vapor y puerta de la cámara cerrada con regresión lineal.



Grafica 8 Prueba 2 Apertura Total de Válvula de entrada de vapor y puerta de la cámara cerrada con regresión lineal.

3. Con el valor de presión obtenido de la gráfica, se buscan los valores de la temperatura (en este caso es un nuevo valor), el volumen específico, la entalpía y el C_p en las tablas de vapor.

Tabla 13 Nube 1 Datos de Tablas de Vapor.

Prueba	Tiempo (s)	Presión (kPa)	T (°C)	T_{tablas} (°C)	H_{vap} (kJ/Kg)	H_{Evap} (kJ/Kg)	H_{Liq} (kJ/Kg)	C_p (kJ/kgK)
1	120	220.6	124	123.4	2712.5	2208.6	518.1	2.1
2	120	185.0	125.2	117.8	2718.6	2193	494.4	2.1
Promedio	120	202.8	124.6	120.6	2715.5	2200.8	506.3	2.1

4. En cada prueba se midió el volumen de agua utilizada y posteriormente se calculó la cantidad de masa gastada⁴, dividiendo la masa gastada entre el tiempo total que duró la prueba (20 min), se obtiene el flujo másico. Debido a que el valor del flujo másico en gramos por segundo es muy pequeña, se decidió reportar en gramos por minuto (Tabla 14). Como se tienen dos valores se realizó un promedio para considerarlo como el valor a utilizar en los cálculos subsecuentes.

$$m_{\text{gastada}} = \rho * V_{\text{gastado}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$F_{\text{másico}} = \frac{m_{\text{gastada}}}{t} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$F_{\text{molar}} = \frac{F_{\text{másico}}}{M} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Dónde:

- ρ : Densidad
- m_{gastada} : Masa gastada de vapor de agua.
- V_{gastado} : Volumen total de vapor de agua gastada.

⁴ Para el cálculo de masa gastada se utilizó la densidad del agua a condiciones estándar.

- $F_{másico}$: Flujo másico.
- F_{molar} : Flujo molar.
- t : Tiempo, estos están reportados en la tabla 13.
- M : Masa molecular.

Tabla 14 Nube 1, Flujo de Agua.

Prueba	Volumen gastado ⁵ (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Masa (Kg)	Flujo másico (g/min)	Flujo molar (mol/min)
1	2900	1	2.9	145	8.05
2	2000	1	2.0	100	5.55
Promedio	2450	1	2.45	122.5	6.81
			Total gastado	2.45 kg	136.11 mol

5. Para obtener el flujo de nitrógeno se dividió la masa gastada entre el tiempo, en el caso 1 fueron 10 kg en 20 min transcurridos. El flujo másico de aire se calculó a partir del volumen de la cámara y la densidad del aire dividido entre los 20 min de la duración del evento. Para el cálculo del flujo molar, tanto del nitrógeno como del aire, se hizo similar al caso de agua con sus respectivas masas molares.

$$m_{aire} = \rho_{aire} * V_{cámara} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Dónde:

- ρ : Densidad
- $m_{gastada}$: Masa gastada de vapor de agua.

⁵ Este volumen se obtuvo a partir del volumen inicial y final reportado en cada tabla de datos experimentales. En la Tabla 11 únicamente se muestra el volumen total gastado convertido en cm³.

- $V_{gastado}$: Volumen total de vapor de agua gastada.

Tabla 15 Nube 1 Flujos.

Flujo	Másico (mol/min)	Molar (mol/min)
N₂	500.00	17.86
Aire	104.09	3.91
Agua	122.50	6.81
Total	726.59	28.58

6. Para facilitar la explicación del Balance de energía se utilizará la ilustración 30.

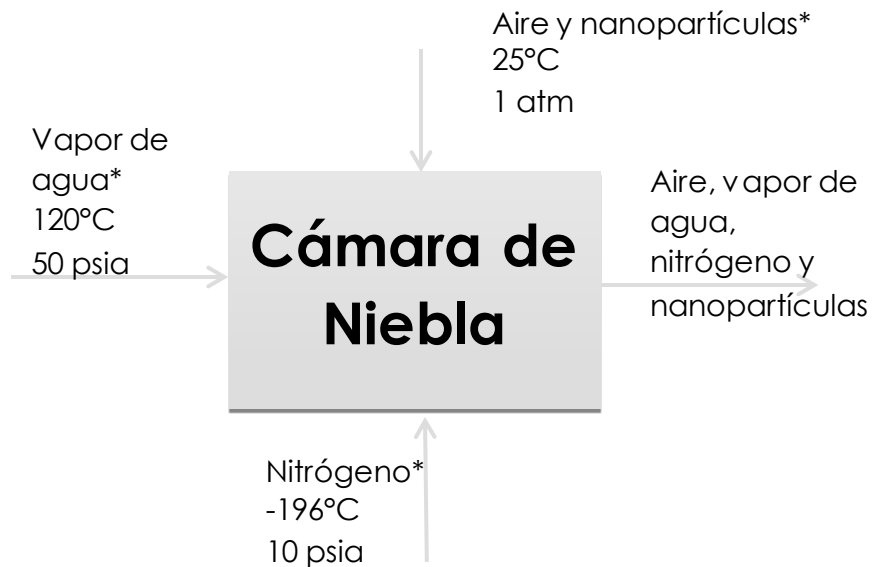


Ilustración 30 Diagrama de flujo de proceso.

Recordando que:

$$\text{calor ganado} = -\text{calor cedido}$$

$$Q_{ganado} = -Q_{cedido} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Ó

$$Q_{ganado} + Q_{cedido} = 0 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Como el intercambio de energía es instantáneo, el sistema no intercambia energía con los alrededores, es adiabático.

Recordando que en el gradiente de temperaturas el calor siempre va del cuerpo que posee la temperatura más alta al que tiene la más baja se pueden expresar las siguientes ecuaciones:

$$Q_{N_2} + Q_{AIRE} + Q_{H_2O} = 0 \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$Q_{N_2} = m_{N_2} C_{pN_2} (T_{nube} - T_{iN_2}) + \lambda_{vap N_2} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$Q_{H_2O} = \frac{V}{F} [m_{H_2O} C_{pH_2O} (T_{nube} - T_{eb}) + m_{H_2O} C_{p vap H_2O} (T_{eb} - T_{iH_2O}) - m_{H_2O} \lambda_{vap H_2O}] \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$Q_{AIRE} = m_{AIRE} C_{pAIRE} (T_{nube} - T_{iAIRE}) \quad (\text{Ecuación 10})$$

Por lo tanto:

$$m_{N_2} C_{pN_2} (T_{nube} - T_{iN_2}) + \lambda_{vap N_2} + m_{AIRE} C_{pAIRE} (T_{nube} - T_{iAIRE}) + \frac{V}{F} [m_{H_2O} C_{pH_2O} (T_{nube} - T_{eb}) + m_{H_2O} C_{p vap H_2O} (T_{eb} - T_{iH_2O}) - m_{H_2O} \lambda_{vap H_2O}] = 0 \quad (\text{Ecuación 11})$$

Dónde:

- Q_{N_2} : calor del nitrógeno.
- Q_{AIRE} : calor del aire.
- Q_{H_2O} : calor del agua.
- m_{N_2} : masa del nitrógeno.
- m_{H_2O} : masa del agua.
- m_{AIRE} : masa del aire.
- T_{eb} : temperatura de ebullición del agua.
- T_{nube} : temperatura de la nube.

- $T_{i N_2}$: temperatura inicial del nitrógeno.
- $T_{i AIRE}$: temperatura inicial del aire.
- $T_{i H_2O}$: temperatura inicial del agua,
- λ_{N_2} : calor latente del nitrógeno.
- $\lambda_{vap H_2O}$: calor latente de vaporización del agua.
- C_{pAIRE} : C_p del aire.
- C_{pN_2} : C_p del nitrógeno.
- C_{pH_2O} : C_p del agua.
- $C_{p vap H_2O}$: C_p del vapor de agua.
- $\frac{V}{F}$: fracción de vapor respecto a la cantidad total de agua en la nube.

Una nube contiene gotas de agua y vapor de agua, esto quiere decir que no necesariamente todo el vapor de agua se condensa durante la formación de la nube, por lo tanto es necesario multiplicar el calor de agua por una fracción de vapor respecto al total de agua contenida en la nube, ya sea en vapor o en gotas. Para obtener esta fracción, que se encuentra alrededor de una fracción de 0.84, se dividió la entalpía de vapor entre la suma de la entalpía de vapor y la entalpía de líquido obtenidas de las tablas de vapor a las condiciones de presión y temperatura a la entrada al sistema.

Para el calor específico del agua se consideraron dos diferentes promedios, uno para la fase líquida que va desde la temperatura de ebullición del agua hasta la temperatura de la nube, el cual se considera constante porque en este rango el C_p no varía significativamente. El otro C_p que se considera es el de vapor, éste se obtuvo de las tablas de vapor y va desde la temperatura de entrada del vapor a la cámara hasta la temperatura de ebullición del agua.

De las ecuaciones anteriores, el único valor que se desconoce es la temperatura de la nube, por lo tanto basta con despejar T_{nube} de la ecuación 11 para conocer su valor.

$$T_{nube} = \frac{m_{N_2} C_{pN_2} T_{iN_2} - \lambda_{vap} N_2 + m_{AIRE} C_{pAIRE} T_{iAIRE} + \frac{V}{F} m_{H_2O} C_{pH_2O} T_{eb} + \frac{-m_{H_2O} C_{p\,vap\,H_2O} (T_{eb} - T_{iH_2O}) + m_{H_2O} \lambda_{vap\,H_2O}}{m_{N_2} C_{pN_2} + m_{AIRE} C_{pAIRE} + \frac{V}{F} m_{H_2O} C_{pH_2O}}}{m_{N_2} C_{pN_2} + m_{AIRE} C_{pAIRE} + \frac{V}{F} m_{H_2O} C_{pH_2O}} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

Tabla 16 Nube 1, Balance de Energía.

Q_{N_2}	243.64 kJ/min
Q_{H_2O}	-250.09 kJ/min
Q_{Aire}	6.44 kJ/min
Q_{Total}	0.00 kJ/min

Tabla 17 Cp de Agua, Aire y Nitrógeno.

	Cp (kJ/kgK)
Agua	4.1868
Aire	1.0048
Nitrógeno	1.0400

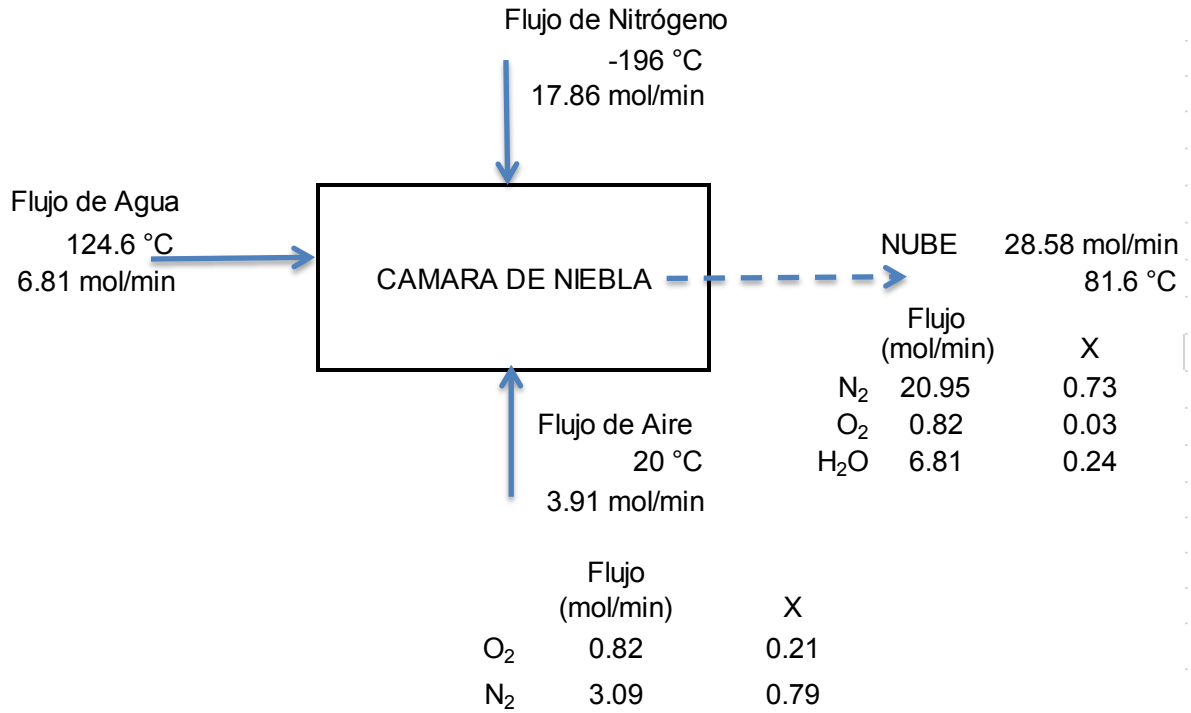


Ilustración 31 DFP

Se obtuvo una nube debido a que el sistema se encuentra sobresaturado. Las gotas de agua se pueden formar debido a la aglomeración de las microgotas de agua o por condensación del vapor. A pesar de que la temperatura es alta (esto comprueba que no todo el vapor se condensa), $81.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, se forma la nube, aunque ésta sea caliente, sin embargo al observarse una sobresaturación existe más agua dentro de la cámara en proporción con el aire que entra y, por lo tanto, que el aire puede contener en él al agua en forma de solución, considerando la dispersión de las partículas de agua y aire, se tiene una mayor dispersión entre las partículas de aire que del agua, entonces existe una suspensión de líquido en gas, esto se debe a que la luz con la que se observa iluminada la nube muestra una difracción, parecida a la de un coloide líquido-sólido, a mayor concentración de partículas el paso de la luz es menor, como se puede ver en la ilustración 32, y con mayor claridad en la parte superior e inferior de la nube.



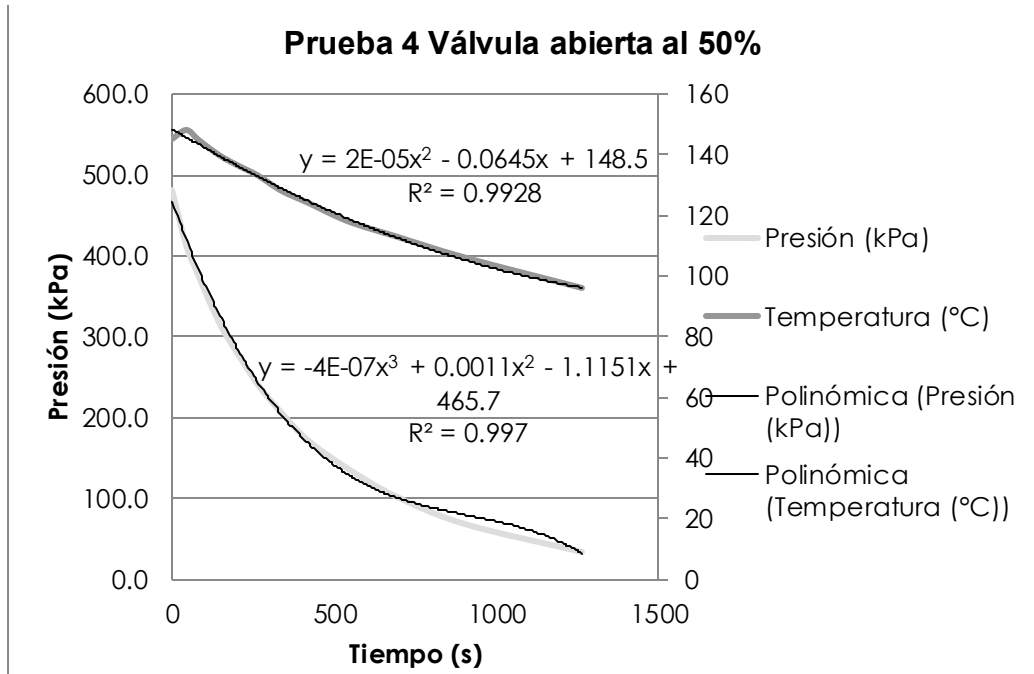
Ilustración 32 Nube 1

5.1.2 NUBE 2

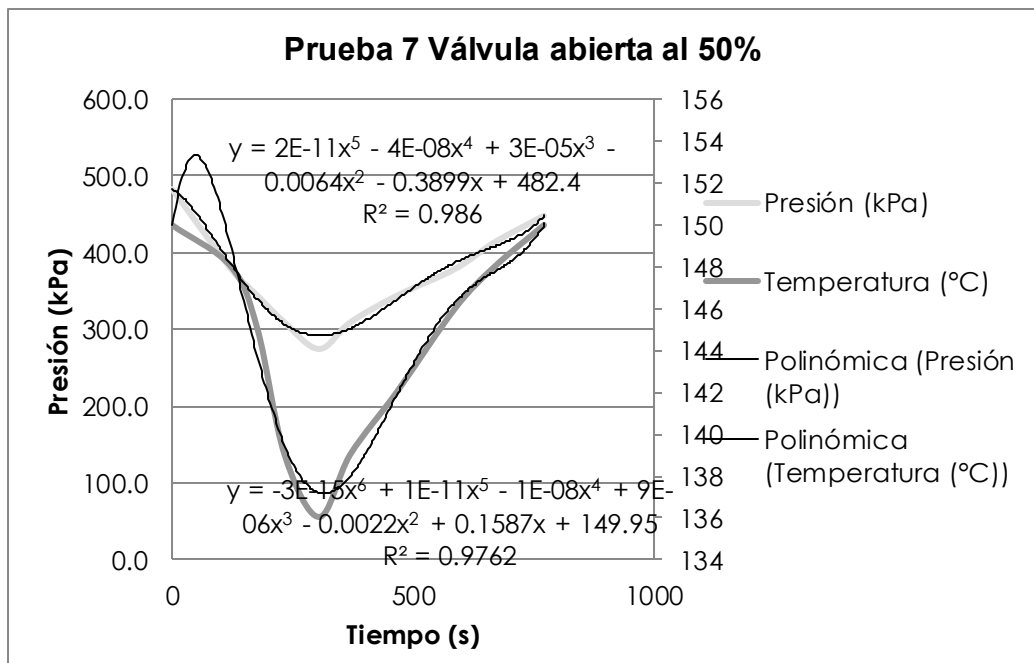
A continuación se presentan los datos obtenidos de la nube 2, la metodología de análisis y cálculo fue la misma que se siguió en el caso anterior, por lo tanto se omitirá la memoria de cálculo de este caso y se mostrarán los resultados obtenidos.

Lineamientos de Caso 2:

1. La selección de temperatura fue de 148 °C para la prueba 7.
2. Regresión lineal



Grafica 9



Grafica 10

3. Obteniendo valores de las tablas de vapor.

Tabla 18 Nube 2, Valores de las Tablas de Vapor.

Prueba	Tiempo (s)	Presión (kPa)	T (°C)	T _{tablas} (°C)	H _{Vap} (kJ/Kg)	H _{Evap} (kJ/Kg)	H _{Liq} (kJ/Kg)	C _p (kJ/kgK)
4	123	344.4	140.9	138.3	2737.4	2149.6	582.1	2.2
7	123	379.2	148.0	141.7	2750.1	2139.4	596.7	2.2
Promedio	123	361.8	144.4	140.0	2743.7	2144.5	589.4	2.2

4. Cálculo del flujo de agua.

Tabla 19 Nube 2, Flujo de Agua.

Prueba	Volumen gastado (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Masa (Kg)	Flujo másico (g/min)	Flujo molar (mol/min)
1	2000	1	2.0	100	5.55
2	2000	1	2.0	100	5.55
Promedio	2000	1	2.0	100	5.55
			Total gastado	2 kg	111.11 mol

5. Cálculo de flujos de aire y nitrógeno

Tabla 20 Nube 2, Flujos.

Flujo	Másico (mol/min)	Molar (mol/min)
N₂	450.00	16.07
Aire	104.09	3.91
Agua	100.00	5.55
Total	654.09	25.54

6. Balance de energía.

Los C_p 's utilizados son los mismos que en el caso 1, ya que las condiciones bajo las que se trabajan ambos casos son semejantes. Para este caso el valor de V/F es 0.82.

Tabla 21 Nube 2, Balance de Energía.

Q_{N_2}	207.94 kJ/min
Q_{H_2O}	-211.84 kJ/min
Q_{Aire}	3.91 kJ/min
Q_{Total}	0.00 kJ/min

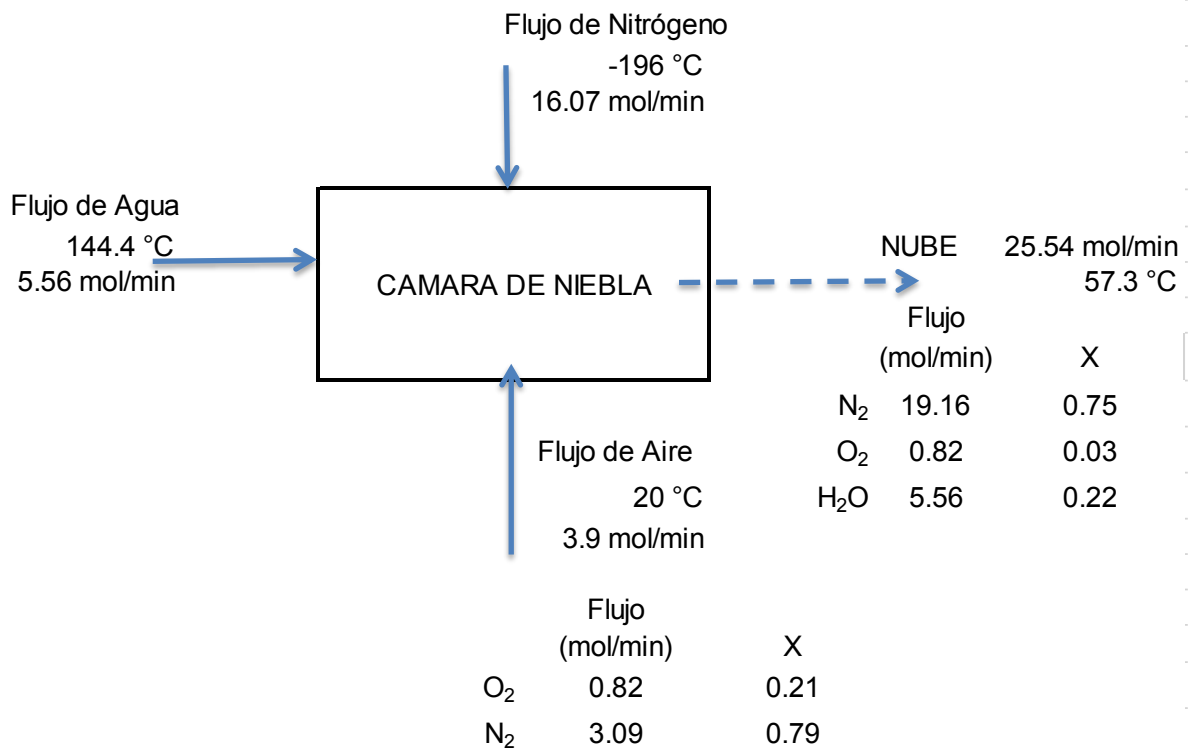


Ilustración 33 DFP



Ilustración 34 Nube 2

El Balance de Materia y Energía se dejó al final debido a que se realizó a partir de las pruebas experimentales realizadas en la escala, gracias a estos cálculos se consiguió reproducir con mayor éxito las posteriores pruebas en escena y mantener durante mayor tiempo la duración de la nube.

5.2 NUBES FORMADAS

A continuación se presentan imágenes de las nubes 1 y 2 respectivamente.

Nube 1:

Tabla 22 Imágenes de la Nube 1.

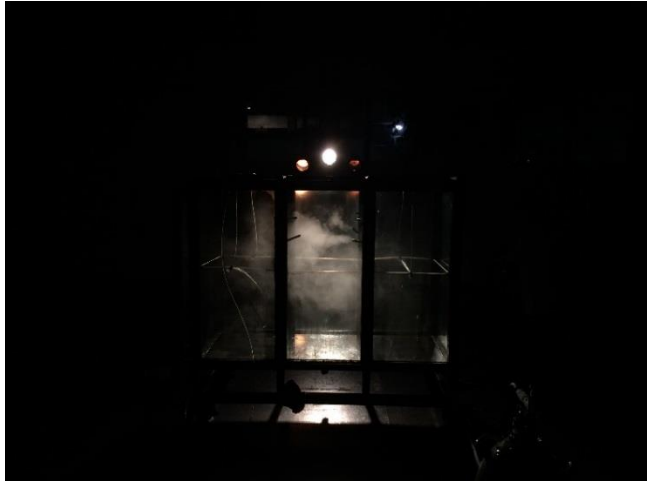

DESCRIPCIÓN	NUBE
<p>Ilustración 35 Stratocúmulus 1</p> <p>Esta nube pertenece a las nubes bajas, debido a las condiciones bajo las que se forma la nube, no es posible realizar nubes más altas.</p>	
<p>Ilustración 36 Stratocúmulus 2</p> <p>Esta nube es parecida a la anterior, por la cantidad de luz que traspasa a la nube, se concluye que es más densa.</p>	

Ilustración 37 Stratocúmulus 3

Esta nube es menos densa que la anterior (por la cantidad de luz que se difracta), sin embargo la forma observada se asemeja a una esfera y también se observa rotación con respecto al eje transversal.

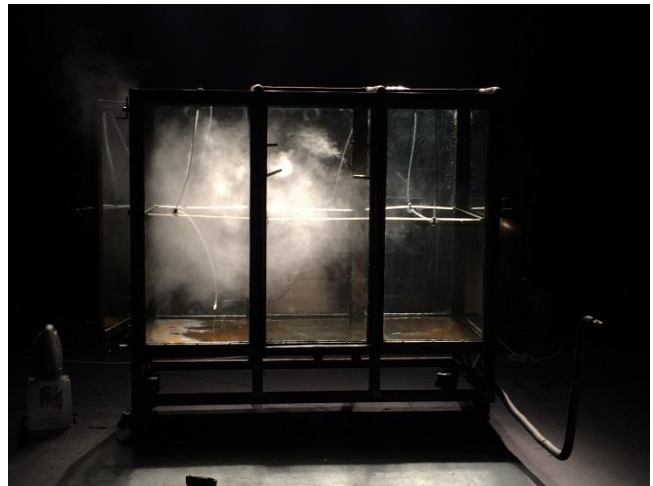


Ilustración 38 Stratocúmulus 4

Esta es la nube más densa que se obtuvo en el proyecto, aquí se observan las líneas de nitrógeno (tubos superiores) y las líneas de vapor de agua (tubos inferiores).



Nube 2:

Tabla 23 Imágenes de la Nube 2.

DESCRIPCIÓN	NUBE
<p>Ilustración 39 Stratus 1</p> <p>A diferencia de la nube 1, la nube 2 es menos densa, como se observa en la ilustración 39.</p>	
<p>Ilustración 40 Stratus 2</p> <p>La nube Stratus en el plano transversal es más extensa que Stratocumulus.</p>	

Ilustración 41 Stratus 3

Esta imagen es parecida a la ilustración 38, sin embargo se aprecia claramente que es menos densa y su forma es más extendida, la rotación no es circular ni en un sólo sentido.



Ilustración 42 Stratus

En esta imagen se puede observar que la nube es más extendida, se confirma lo escrito en la ilustración 40.



Después de observar y comparar las nubes formadas con la clasificación de nubes del *Atlas Internacional de Nubes* podemos deducir que: los dos tipos de nubes pertenecen a la familia C (Bajas) y se forman por debajo de los 2000 m de altura a una temperatura de -20°C en la atmósfera. Su género se encuentra dentro de la

clasificación de las Stratocumulus, para la nube 1, y Stratus para la nube 2, (Ver Capítulo 2, 2.3.2 Clasificación, Tabla 3)⁶.

En la nube 2 (Stratus) se requirió un menor cantidad de agua y se disminuyó el flujo de nitrógeno y aire por el tipo de nube que es, como la nube stratus es menos densa, de las nubes más bajas que existen, requiere de menores condiciones para que se condense, esto lo vemos por el paso de luz que ésta permite, como se observa en la anteriores ilustraciones.

⁶ Demás imágenes sobre la formación de nubes Stratus y Stratocumulus las encontraremos en el ANEXO III FOTOS DE LAS PRUEBAS EN La ESCALA.

CONCLUSIONES

El proceso de formación de nubes involucra las condiciones específicas como: temperaturas bajas, sobresaturación de agua, corrientes de aire y para facilitar la formación de la nube, la existencia de nano partículas que sirven como nucleótidos donde existe adherencia de agua.

Gracias a que estas condiciones se pudieron controlar y se alcanza el estado estacionario, la formación de nubes se mantuvo más de los 5 minutos propuestos, alcanzando un total de 20 minutos.

Controlando estas condiciones, en el presente proyecto, se formaron y estudiaron específicamente dos tipos de nubes: Stratus y Stratocumulus, ambas de la familia C (nubes bajas).

Se puede comparar el grado de condensación en cada nube por el factor V/F , pues en el caso de Stratus es de 0.82 y en el de Stratocumulus de 0.84, lo que implica que Stratocumulus es más condensada que Stratus.

Con los datos obtenidos se pueden establecer diferentes elementos acerca de nubes y también se puede calcular y establecer su comportamiento, por ejemplo: su aspecto, formación, tanto el tiempo como el proceso que siguen para formarse y entender su comportamiento. Además pueden desarrollarse aplicaciones para la vida real, por ejemplo para la agricultura en épocas de sequía, predicción de su formación en temporales o sencillamente por estética, como es el caso de este trabajo, para una puesta en escena del INBA.

Sin embargo al estudiar los parámetros y aspectos que definen las nubes, se puede observar que es difícil controlar el vapor de agua con el choque de nitrógeno a bajas temperaturas y altas corrientes de aire, y a final de cuentas, ¿cómo saber si realmente tenemos nube?... La respuesta, además de los datos que se obtuvieron de sobresaturación, la podemos ver en la siguiente imagen, donde se aprecian el choque y el cambio de dirección del movimiento de las partículas, también se observa el agua, deslizarse y las pequeñas partículas que fungen el papel de

nucléolos para la formación de nubes, se observa que poco a poco se van acumulando para su posterior precipitación.⁷



Ilustración 43 Zoom a la estructura de una nube.

Las nubes no necesariamente necesitan los Núcleos de Condensación, ya que, con una sobresaturación y un choque de temperatura inmediato se da la condensación inmediata del vapor de agua para la formación de la nube, como se puede apreciar en la ilustración 43.

⁷ Aunque no fue caso de estudio del presente trabajo, una imagen de esto se encuentra en el ANEXO III FOTOS DE LAS PRUEBAS EN LA ESCALA.



Ilustración 44 Nube formada sin Núcleos de Condensación

Debido a que las corrientes de aire necesitan ser mayores a las capacidades de las que ofrece el compresor a través de las líneas de aire, se sugiere que se cambien las líneas antes mencionadas por ventiladores integrados a la cámara y que se puedan manejar de manera independiente. También se sugiere que tenga ventanas de diversos tamaños que se puedan abrir, con la finalidad de que se genere una mayor variedad de corrientes de aire. Por último es necesario poner un desagüe en el suelo de la escala para evitar la acumulación del condensado en el suelo de la cámara.

REFERENCIAS

- Anónimo. (s.f.). Composición y estructura de la atmósfera. *Instituto Politécnico Nacional*.
- AstroMía. (8 de Junio de 2015). Obtenido de AstroMía Web site:
<http://www.astromia.com/tierraluna/capatmosfera.htm>
- Británica, E. d. (9 de Mayo de 2015). *Encyclopedía Britannica*. Obtenido de Encyclopedía Britannica Web Site:
<http://global.britannica.com/EBchecked/topic/526986/Vincent-Joseph-Schaefer>
- Distancia, U. N. (3 de Septiembre de 2015). *Universidad Nacional abierta y a Distancia*. Obtenido de Lección 16-Mezclas gaseosas. La atmósfera terrestre:
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358005/contLinea/leccin_16__mezclas_gaseosas.html
- G., K. N. (1975). *Manual de Física elemental*. Mir.
- Gamero, A. (6 de Mayo de 2015). *BERNDNAUT SMILDE, EL HOMBRE QUE COLECCIONABA* . Obtenido de La piedra de Sisifo:
<http://lapiedradesisifo.com/2013/01/28/berndnaut-smilde-el-hombre-que-coleccionaba-nubes/>
- Ground, S. f. (9 de Mayo de 2015). *Baseed Cloud Seeding*. Obtenido de Weather Modification Incorporated Wb Site:
<http://www.weathermodification.com/cloud-seeding-ground.php>
- Huggins, A. (9 de Mayo de 2015). *Scientific American* . Obtenido de Scientific American Web Site: <http://www.scientificamerican.com/article/cloud-seeding-china-snow/>
- Javier. (6 de Mayo de 2015). *Noticias El Tiempo* . Obtenido de Noticias El Tiempo Web Site: <http://noticias.eltiempo.es/2014/09/09/nubes-artificiales-en-qatar-2022/>
- Kroenke, D., & Auer, D. (2009). *Database Concepts*. New Jersey: Prentice Hall.
- Mundial, O. M. (1993). *Atlas Internacional de Nubes Volumen I*. Ginebra: Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial.
- Nalbandyan, O. (2011). The Clouds Microstructure and the Rain Stimulation by Acoustic Waves. *Scientific Research, Atmospheric and Climate Sciences*,

86-90.

Phillips, D. T. (9 de Junio de 2015). *Nasa Science*. Obtenido de Noctilucent Clouds Get an Early Start: http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2013/07jun_nlcs/

Phillips, T. (29 de Junio de 2015). *Nasa Science News*. Obtenido de National Aeronautics and Space Administration: http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2012/07aug_meteorSmoke/

Renom, M. (s.f.). Nubes y Procesos de Precipitación. *Facultad de Ciencias, UNAM*.

Rosén, P. (29 de Junio de 2015). *El universo hoy*. Obtenido de El universo hoy web Site: <http://www.eluniversohoy.com/nubes-suecia0130802/>

Smilde, B. (6 de Mayo de 2015). *Berndnaut*. Obtenido de Berndnaut Web site: <http://www.berndnaut.nl/text.htm>

Sonia. (6 de Mayo de 2015). *Un rinconcito de colores*. Obtenido de Blogspot: <http://unrinconcitodecolores.blogspot.mx/2012/03/una-nube-dentro-del-salon.html>

Sorin, N., Valeriu, F., Sabina, S., & Boscornea, A. (2014). Assessing the size distribution of droplets in a cloud chamber from light extinction data during a transient regime. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 29-36.

Whistle, Canut, M., & Rivera, N. (6 de Mayo de 2015). *Las nubes Artificiales de Berndnaut Smilde*. Obtenido de Exoerien Sense Web Site: <http://www.experiensense.com/las-nubes-artificiales-de-berndnaut-smilde/>

Ztfnews. (9 de Mayo de 2015). *ZTFNews*. Obtenido de ZTFNews: <https://ztfnews.wordpress.com/2014/08/29/bernard-vonnegut-sembrando-nubes/>

ANEXO I DEFINICIONES DE NUBES

La siguiente información es obtenida del “Atlas de las Nubes” de la OMM.

GÉNEROS

Cirrus

Nubes separadas en forma de filamentos blancos y delicados., o de bancos o bandas estrechas, blancas o casi blancas. Estas nubes tienen una apariencia fibrosa (semejante a cabellos), o de brillo sedoso o de ambos a la vez.

Cirrocumulus

Banco, capa delgada o sábana de nubes blancas, sin sombras, compuestas por elementos muy pequeños en forma de granos, ondulaciones, etc., unidos o separados y distribuidos con mayor o menor regularidad; la mayoría de los elementos tienen una anchura aparente inferior a un grado.

Cirrostratus

Velo nuboso transparente y blanquecino, de aspecto fibroso (parecido a cabellos) o liso, que cubre total o parcialmente el cielo y que produce generalmente halos.

Alto cumulus

Banco, capa delgada o capa de nubes blancas o grises, o a la vez blancas y grises, que tienen sombras compuestas por losetas, masas redondeadas, rodillos, etc., las cuales son a veces parcialmente fibrosas o difusas y que pueden estar unidas o no; la mayoría de los elementos pequeños distribuidos con regularidad tienen, por lo general, una anchura aparente comprendida entre uno y cinco grados.

Altostratus

Lámina o capa de nubes, grisácea o azulada, de aspecto estriado, fibroso o uniforme, que cubre por entero o parcialmente el cielo. Tiene partes suficientemente

delgadas que permiten distinguir vagamente el Sol, como a través de un vidrio deslustrado. Los Altostratus no producen halos.

Nimbostratus

Capa de nubes gris, a menudo oscura, con un aspecto velado por la precipitación de lluvia o nieve que cae más o menos continuamente desde ella, llegando en la mayoría de los casos al suelo. El espesor de esta capa es por todas partes suficiente para ocultar completamente el Sol. Por debajo de la capa existen con frecuencia nubes bajas, en jirones, que pueden o no estar unidas con ella.

Stratocumulus

Banco, sábana o capa de nubes, grises o blanquecinas, o a la vez grises y lanquecinas, que tienen casi siempre partes oscuras; compuestas por losetas, masas redondeadas, rodillos, etc., que no son fibrosas (excepto la virga) y que pueden estar unidas o no; la mayoría de los elementos pequeños distribuidos con regularidad tienen, por lo general, una anchura aparente superior a los cinco grados.

Stratus

Capa de nubes generalmente gris, con una base relativamente uniforme, de la que pueden caer llovizna, prismas de hielo o cinarra. Cuando el Sol es visible a través de la capa, su contorno se distingue claramente. Los Stratus no producen halos, salvo quizás a temperaturas muy bajas. Se presentan a veces en forma de jirones deshilachados.

Cumulus

Nubes aisladas, en general densas y con contornos bien definidos, que se desarrollan verticalmente en forma de protuberancias, cúpulas o torres, y cuyas partes superiores convexas se parecen con frecuencia a una coliflor. Las partes de estas nubes iluminadas por el Sol son, en su mayoría, de un blanco brillante; su base es relativamente oscura y casi horizontal. Los Cumulus a veces aparecen desgarrados.

Cumulonimbus

Nube maciza y densa, con un desarrollo vertical considerable, en forma de montaña o de enormes torres. Parte, al menos, de su cima es normalmente lisa, fibrosa o estriada, y casi siempre aplastada; esta parte se extiende a menudo en forma de un yunque o de un vasto penacho. Por debajo de la base, a menudo muy oscura, de esta nube aparecen con frecuencia nubes bajas desgarradas, unidas o no con ella, y precipitaciones, a veces en forma de virga.

ESPECIES

Fibratus

Nubes separadas o velo de nubes delgado, en forma de filamentos rectilíneos o curvados, más o menos irregularmente, que no terminan en ganchos ni en copos. Este término se aplica principalmente a los Cirrus y los Cirrostratus.

Uncinus

Cirrus, a menudo en forma de coma, que termina por la parte de arriba en un gancho o un copo cuya parte superior no tiene la forma de una protuberancia redondeada.

Spissatus

Cirros cuyo espesor óptico es suficiente para que parezca grisáceo cuando se ve mirando hacia el Sol.

Castellanus

Nubes que presentan, al menos en alguna parte de su región superior, protuberancias cumuliformes en forma de torrecillas que dan a estas nubes un aspecto de almenas. Estas torrecillas, algunas de las cuales son más altas que anchas, poseen una base común y parecen estar dispuestas en líneas. El carácter castellanus es especialmente evidente cuando se mira a la nube desde un lado. Este término se aplica a los Cirrus, los Cirrocumulus, los Altopumulus y los Stratocumulus.

Floccus

Especie de nube en la que cada elemento está formado por un copo pequeño de aspecto cumuliforme, cuya parte inferior está más o menos desgarrada y acompañada a menudo de virga. Este término se aplica a los Cirrus, los Cirrocumulus, los Altocumulus y los Stratocumulus.

Stratiformis

Nube extendida en una capa delgada, o en una capa horizontal, que presenta la apariencia de los Stratus de grandes dimensiones. Este término se aplica a los Altocumulus, los Stratocumulus y, en ocasiones, los Cirrocumulus.

Nebulosus

Nube, parecida a un velo o capa nebulosos, que no muestra detalles nítidos. Este término se aplica principalmente a los Cirrostratus y a los Stratus.

Lenticularis

Nubes con forma de lentes o de almendras, comúnmente muy alargadas y de contornos en general bien definidos; a veces presentan irisaciones. Estas nubes aparecen con mayor frecuencia en formaciones de nubes de origen orográfico, pero también pueden observarse sobre regiones sin relieve marcado. Este término se aplica principalmente a los Cirrocumulus, Altocumulus y Stratocumulus.

Fractus

Nubes en forma de jirones irregulares y con aspecto claramente desgarrado. Este término se aplica sólo a los Stratus y a los Cumulus.

Humilis

Nubes de tipo Cumulus con pequeño desarrollo vertical; aparecen generalmente aplastadas.

Mediocris

Cumulus con un desarrollo vertical moderado, cuyas cimas muestran protuberancias bastante pequeñas.

Congestus

Nubes Cumulus que presentan protuberancias muy desarrolladas y que tienen a menudo una importante extensión vertical; su región superior protuberante tiene con frecuencia el aspecto de una coliflor.

Calvus

Cumulonimbus en que algunas, al menos, de las protuberancias de su parte superior comienzan a perder su aspecto cumuliforme pero en el que no puede verse parte alguna cirriforme. Las protuberancias y los brotes tienen tendencia a formar una masa blanquecina con estrías más o menos verticales.

Capillatus

Cumulonimbus caracterizado por la presencia, especialmente en su parte superior, de partes netamente cirriformes de estructura claramente fibrosa o estriada y con frecuencia en forma de un yunque, un penacho o una enorme masa más o menos desordenada de cabellos. Este tipo de nube viene generalmente acompañado por chubascos o por tormentas, a menudo con turbonadas y a veces con granizo; frecuentemente origina una nube virga muy nítida.

VARIEDADES

Intortus

Cirrus, cuyos filamentos están curvados muy irregularmente y con frecuencia entremezclados caprichosamente.

Vertebratus

Nubes cuyos elementos están dispuestos de tal manera que su aspecto sugiere el de vértebras, el de costillas o el de un esqueleto de pescado. Este término se aplica principalmente a los Cirrus.

Undulatus

Nubes en bancos, sábanas o capas que presentan ondulaciones. Estas ondulaciones pueden observarse tanto en capas de nubes relativamente uniformes como en nubes compuestas por elementos separados o unidos. Algunas veces se ve un doble sistema de ondulaciones. Este término se aplica principalmente a los Cirrocumulus, Cirrostratus, Altocumulus, Altostratus, Stratocumulus y Stratus.

Radiatus

Nubes que presentan anchas bandas paralelas o que forman bandas paralelas, las cuales, debido a un efecto de perspectiva, parecen converger hacia un punto del horizonte, o cuando las bandas cruzan todo el cielo, hacia dos puntos opuestos, llamados puntos de radiación. Este término se aplica principalmente a los Cirrus, Altocumulus, Altostratus, Stratocumulus y Cumulus.

Lacunosus

Banco, sábana o capa de nubes, normalmente bastante finas, salpicadas con claros circulares distribuidos más o menos regularmente, muchos de ellos con los bordes deshilachados. Los elementos nubosos y los claros están frecuentemente distribuidos de manera que sugieren una red o un panal. Este término se aplica principalmente a los Cirrocumulus y a los Altocumulus; puede también aplicarse, aunque muy raramente, a los Stratocumulus.

Duplicatus

Banco, sábana o capa de nubes a diferentes niveles y superpuestas, a veces parcialmente unidas. Este término se aplica principalmente a los Cirrus, los Cirrostratus, los Altocumulus, los Altostratus y los Stratocumulus.

Translucidus

Nubes en banco, sábana o capa extensa, la mayor parte de las cuales son suficientemente traslúcidas para dejar entrever la posición del Sol o de la Luna. Este término se aplica a los Altocumulus, Altostratus, Stratocumulus y Stratus *Perlucidus*

Banco, sábana o capa de nubes de gran extensión con claros bien marcados entre sus elementos, pero a veces muy pequeños. Los claros dejan ver el Sol, la Luna, el azul del cielo y otras nubes a niveles más altos. Este término se aplica a los *Altostratus* y al *Stratocumulus*.

Opacus

Banco, sábana o capa de nubes de gran extensión, siendo la mayor parte suficientemente opaca para ocultar completamente el Sol o la Luna. Este término se aplica a los *Altostratus*, *Stratocumulus* y *Stratus*.

ANEXO II LA ESCALA Y SUS EQUIPOS



Ilustración 45 La escala y sus equipos



Ilustración 46 La escala de frente



Ilustración 47 La escala de perfil



Ilustración 48 Compresor



Ilustración 49 Tanque de Nitro



Ilustración 50 Tanque de nitro



Ilustración 51 Hervidor



Ilustración 52 Mangueras

ANEXO III FOTOS DE LAS PRUEBAS EN LA ESCALA

Preparación de la cámara para la formación de nubes.



DESCRIPCIÓN	IMAGEN
<p>Ilustración 53 Preparación del Nitrógeno.</p> <p>Se revisaban que el tanque de nitrógeno estuviera, de preferencia, lleno o por arriba de la mitad de su capacidad y que la presión del tanque fuera mínimo de 5 psi (34.5 kPa).</p>	 A person wearing a white lab coat and safety glasses is sitting on a metal platform, working with a large white nitrogen tank. The tank has a blue label with the number '1020' and some text. The person is looking down at the tank. The background is dark, and there is a bright light source in the upper left corner.
<p>Ilustración 54 Cámara saturada de vapor</p> <p>Como parte del evento, había un momento en el que se tenía que saturar la cámara, esto facilitaba la posterior formación de las nubes.</p>	 A group of people in white lab coats are standing around a large, illuminated chamber in a dark room. The chamber is rectangular and has a bright light source inside, making it the central focus. The people are looking at the chamber and talking to each other. The room is dark, and the floor is visible.

Ilustración 55 Cámara saturada a la mitad de vapor

Esta prueba era difícil de lograr, se hacía sin corrientes de aire, sin nitrógeno y con la apertura de la válvula al 50%.



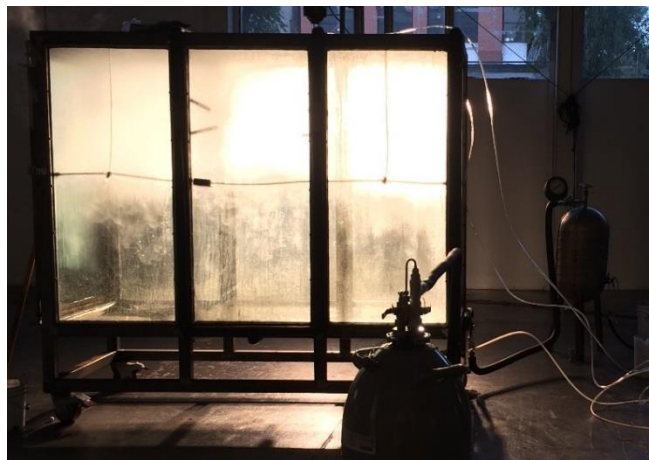
Ilustración 56 Reconexión de mangueras

Para pasar de la formación de una nube Stratus a una nube Stratocumulus se reconectaban las líneas de aire para aumentar el flujo de aire dentro de la cámara.



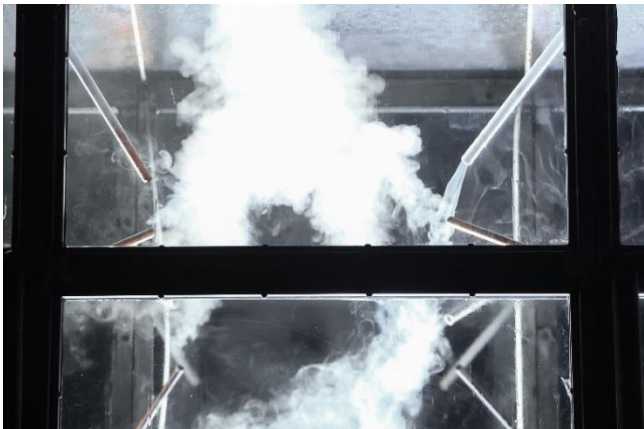


Ilustración 57 Algunas gotas cayendo

Este evento se logró por azar inyectando una mayor cantidad de nitrógeno de lo requerido.



Otras imágenes

DESCRIPCIÓN	IMAGEN
<p>Ilustración 58 Choque del nitrógeno y del vapor de agua</p> <p>El vapor de agua se condensa de forma inmediata al entrar en contacto con el nitrógeno.</p>	
<p>Ilustración 59 Formación de una nube.</p> <p>Este es el borde de la nube durante su formación, se aprecia que existe un intercambio de vapor de agua con los alrededores.</p>	
<p>Ilustración 60 Líneas.</p> <p>Se observan las líneas de nitrógeno (superiores) con agua condensada en su superficie y las líneas de vapor (inferiores) sin agua condensada en su superficie, lo que es curioso porque el ambiente es el mismo, pero se debe al tipo de fluido que cada línea transporta.</p>	

ANEXO IV GLOSARIO

A continuación se presentan definiciones, que son citas textuales de diferentes fuentes:

ⁱ Fenómenos de halo: Un halo, antelia o aro iris es un efecto óptico en forma de disco alrededor de la Luna o el Sol y que presenta un anillo iridiscente en su circunferencia exterior. El halo está causado por partículas de hielo en suspensión en la tropósfera que refractan la luz generando un espectro de colores alrededor de la Luna o el Sol. Usualmente se ve en lugares fríos como Antártida, Alaska, Groenlandia, norte de Escandinavia, zonas boreales de Rusia, Canadá; aunque también puede ocurrir en otros lugares, si se dan las condiciones atmosféricas adecuadas, como por ejemplo fuera de las áreas polares, en zonas donde se estén desarrollando tormentas o haya mal tiempo, o en zonas templadas cuando el aire atmosférico posea ligeras nubes cristalizadas por el frío (casi siempre nubes del tipo cirrus).

ⁱⁱ Arco Iris: es un fenómeno óptico y meteorológico, consiste en la descomposición de la luz solar en el espectro visible continuo en el cielo, se produce por refracción cuando los rayos del sol atraviesan pequeñas gotas de agua contenidas en la atmósfera terrestre. Es un arco multicolor con el rojo hacia la parte exterior y el violeta hacia el interior.

ⁱⁱⁱ Anillo de Bishop: Un anillo de Bishop es un halo difuso marrón o azulino observado alrededor del sol. Generalmente aparece después de inmensas erupciones volcánicas. La primera observación registrada de un anillo de Bishop fue por Rev. S. Bishop de Honolulu, después de la erupción de Krakatoa en 1883.

^{iv} Rayos crepusculares: son rayos de luz solar a través de partículas de aire, los cuales parecen irradiar desde un punto único en el cielo. Fluyen a través de aberturas en las nubes (sobre todo estratocúmulos), o entre otros objetos. El

nombre viene de sus apariciones frecuentes durante las horas crepusculares (amanecer y atardecer), cuando los contrastes entre luz y oscuridad son los más obvios. Crepuscular viene de la palabra latina crepusculum que significa crepúsculo.

v Espejismos: Un espejismo es una ilusión óptica en la que los objetos lejanos aparecen reflejados en una superficie lisa como si se estuviera contemplando una superficie líquida que, en realidad, no existe.

vi Trepidaciones ópticas: Temblor o vibración de las partículas de aire con movimientos pequeños y rápidos, ocasionado por que las partículas reciben diferentes grados de energía de los rayos luminosos, al pasar éstos por el aire son refractados produciendo éste fenómeno.

vii Colores Crepusculares: son colores generados a partir de la refracción de rayos crepusculares en la atmósfera.

viii Fuego de San Telmo: El fuego de San Telmo o Santelmo es un meteoro ígneo consistente en una descarga de efecto corona electroluminiscente provocada por la ionización del aire dentro del fuerte campo eléctrico que originan las tormentas eléctricas.

ix Aurora Polar: es un fenómeno en forma de brillo o luminiscencia que se presenta en el cielo nocturno, generalmente en zonas polares, aunque puede aparecer en otras zonas del mundo durante breves períodos. En el hemisferio sur es conocida como aurora austral, y en el hemisferio norte como aurora boreal, cuyo nombre proviene de Aurora, la diosa romana del amanecer, y de la palabra griega Bóreas, que significa norte

x Higróscopicos: es la capacidad de algunas sustancias de absorber humedad del medio circundante. También es sinónimo de higrometría, siendo ésta el estudio de la humedad, sus causas y variaciones (en particular de la humedad atmosférica).

^{xi} Estratiformes: que tiene forma de estratos, en geología se llama estrato a cada una de las capas en que se presentan divididos los diferentes tipos de sedimentos.

^{xii} Nubes de Desarrollo Vertical: generalmente son nubes Cumulus y Cumulonimbus, son nubes cuyo desarrollo se da de forma ascendente, internamente formadas por una columna de aire cálido y húmedo que se eleva en forma de espiral rotatorio. Su base suele encontrarse a menos de 2 km de altura mientras que la cima puede alcanzar unos 15 a 20 km de altitud.

^{xiii} Cumuliformes: Tipo de nubes con base plana, blanca y aspecto denso. Incluye a los cúmulos, estratocúmulos, cumulonimbos, altocúmulos y cirrocúmulos.

^{xiv} Parcela: pequeña porción de terreno (proveniente de otro más grande) que puede ser utilizada para diferentes motivos. Se usa frecuentemente en las construcciones urbanísticas.