

# Pasaje de un b61ido a trav61s de la atm61sfera

Mat61as L61pez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de la Rep61blica; Montevideo, Uruguay

Agosto 2019

## Abstract

El objetivo de este trabajo es determinar la trayectoria de un b61ido que ingres61 a la atm61sfera el 4 de abril del a61o 2005 en la zona sur del Uruguay a partir de informaci61n brindada por testigos del lugar.

## 1 Testimonios

Estas fueron algunos de los testimonios de los testigos que observaron el cuerpo celeste:

- "Eso no es chatarra ni un meteorito jeso es un misil!", piloto de un MD11 de Lufthansa
- "Una gran luminosidad en el cielo que apareci61 sobre mi izquierda, iba con trayectoria rumbo al Este. Una gran luminosidad que se transform61 en una bola de fuego incandescente que podr61a ser considerada un cuerpo celeste o un cohete"; teniente coronel Walter Alvarado
- "Me aferro a la idea de que se trat61 del cohete de un misil o la tobera de un aviaci61n de alta performance. Las hip61tesis podr61an ser muchas y es resorte de la Fuerza A61rea realizar las investigaciones"; Alvarado
- "Podr61a tratarse de una prueba de bal61stica desde una fragata en el R61o de la Plata". (ANSA)

Por otra parte, vecinos de Juan Lacaze (Puerto Sauce) y Nueva Helvecia, en el departamento (provincia) de Colonia, relataron que el lunes pasado avistaron la luminosidad y escucharon una fuerte explosi61n.

- "Cerca de las cuatro de la ma61ana, est61bamos durmiendo, sentimos como una gran explosi61n que hizo vibrar los vidrios y el techo. Nos asustamos. Mi esposo sali61 de la casa y no vimos nada raro. Al otro d61a nos enteramos que otras personas en el departamento tambi61n lo hab61an escuchado".

## 2 Zona de avistamientos



Figure 1: Zona de Avistamientos

## 3 Primeras conclusiones

La descripción de la apariencia física concuerda con la descripción de un bólido muy brillante (color, cola, duración, velocidad).

Un bólido tiene una trayectoria rectilínea en el espacio, describiendo una trayectoria aparente según un círculo máximo. El mismo alcanza el máximo brillo a mitad de la trayectoria y los estruendos serían el producto del boom sónico.

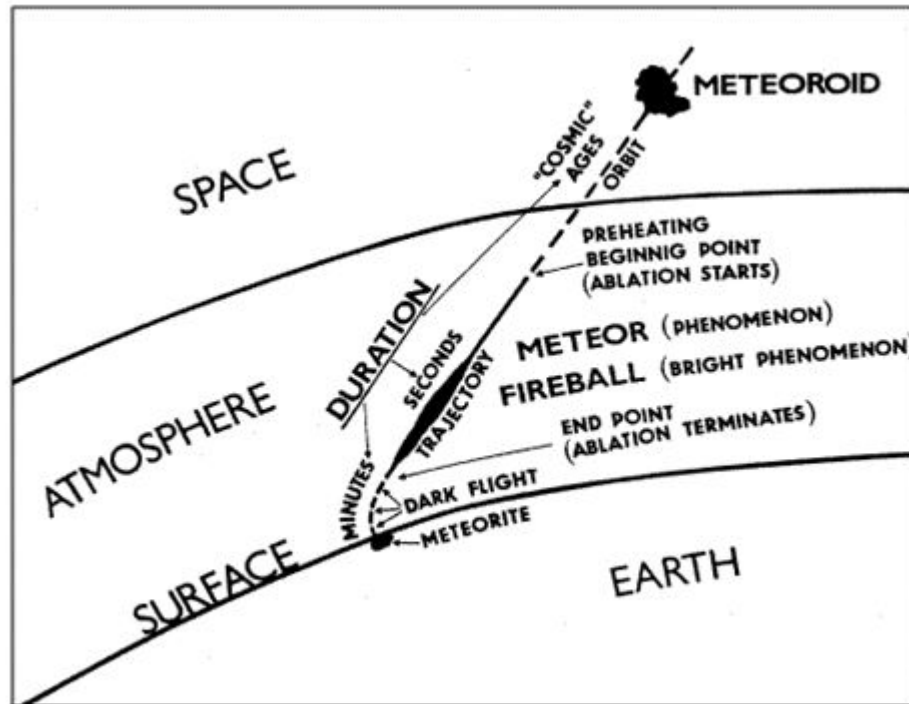


Figure 2. Basic terminology for meteors.

## 4 Métodos y procedimientos

La base del trabajo fue realizar el cómputo de la trayectoria del bólido a partir de las observaciones brindadas por los testigos. Para ello utilizamos el método de mínimos cuadrados.

Cada uno de los 26 testigos entrevistados proporcionó datos aproximados respecto a la trayectoria del cuerpo en el cielo como son el acimut y la altura en tres diferentes puntos: al inicio, en el punto intermedio, y al final, con el acimut medido desde el Norte en el sentido NESO.

Aquellos datos que no fueron proporcionados por el observador figuran como cero. En cuanto a la altura del lugar, se puede asumir cero ya que los testigos se encontraban sobre el nivel del mar.

Nº observadores	Longitud del testigo (Días Minutos Segundos)			Latitud del testigo (Días Minutos Segundos)			Altura del lugar	Acimut inicial	Altura inicial	Acimut medio	Altura medio	Acimut final	Altura final
1	-56	42	29.4	-34	20	32.3	0	283	15	0	0	256	20
2	-56	42	21.6	-34	25	16.6	0	316	10	0	0	216	12
3	-56	37	27.6	-34	10	31.3	0	349	4	253	29	216	4
4	-57	3	27.4	-34	21	46.8	0	255	89	0	0	165	3
5	-57	0	38.1	-34	20	0.0	0	291	19	0	0	199	19
6	-57	12	42.8	-34	17	50.7	0	276	15	200	21	169	5
7	-57	12	46.7	-34	17	58.5	0	278	22	226	27	150	19
8	-57	24	40.9	-34	25	4.7	0	282	62	0	0	52	65
9	-57	15	45.9	-34	20	13.2	0	218	41	0	0	172	41
10	-56	47	10.6	-34	38	38.2	0	306	3	0	0	285	43
11	-56	51	53.2	-34	31	5.1	0	25	2	313	60	203	4
12	-57	2	49.6	-34	27	20.4	0	310	34	0	0	213	19
13	-57	1	0.4	-34	27	44.9	0	297	13	234	29	157	12
14	-57	36	10.8	-34	16	21.6	0	138	52	0	0	121	5
15	-57	31	5.8	-34	12	14.2	0	262	10	0	0	218	12
16	-57	50	45.5	-34	26	45.0	0	42	50	0	0	81	16
17	-57	50	22.2	-34	27	33.3	0	332	30	51	31	113	25
18	-58	24	27.5	-33	52	15.1	0	97	30	125	26	139	15
19	-58	0	48.1	-34	7	32.5	0	316	11	23	56	106	2
20	-58	17	12.0	-34	0	34.0	0	318	21	32	24	109	9
21	-58	24	36.0	-33	56	6.0	0	97	53	0	0	127	13
22	-57	22	48.0	-33	52	50.0	0	55	12	127	67	194	5
23	-57	20	59.0	-33	52	36.0	0	286	69	0	0	182	5
24	-57	27	34.0	-33	45	33.0	0	240	23	215	23	158	17
25	-57	30	7.0	-33	49	36.0	0	290	29	230	25	179	19
26	-57	36	50.0	-33	59	17.0	0	269	44	213	51	148	21

Figure 2: Datos utilizados

A partir de estos datos se debe calcular en un referencial 'X Y Z' -en coordenadas cartesianas-, la posición de cada observador y un vector director para cada una de las tres posiciones medidas del meteoro en el cielo. Para las posiciones se utilizó el sistema de coordenadas universal transversal de Mercator (UTM).

Con los vectores de las direcciones, se calcula el vector perpendicular al plano que los contiene, donde cada par de direcciones define un plano. De esta manera, si hay tres mediciones, deberemos promediar la dirección del vector perpendicular.

Si el número de testigos es "n", tendremos los datos necesarios para definir un plano en el espacio:

$P_i$ , con  $i = 1, \dots, n$  los vectores posición

$N_i$  con  $i = 1, \dots, n$  los vectores normales a cada plano.

Ahora, con esta información debemos buscar la solución de mínimos cuadrados de la intersección de todos estos planos.

## 5 Mínimos cuadrados

Una trayectoria rectilínea en el espacio la definimos por un versor  $\hat{x}$  y un punto Y definido por el vector  $\vec{y}$ . La trayectoria rectilínea debe cumplir las siguientes condiciones:

- La normal  $N_i$  cada uno de los planos de la visual debe ser perpendicular a la trayectoria.

$$N_i \cdot \hat{x} = 0$$

- La normal  $N_i$  cada uno de los planos de la visual debe ser perpendicular a una recta que une al observador  $P_i$  con un punto Y de la trayectoria.

$$N_i \cdot P_i \cdot Y = 0$$

- Si C es el centro de coordenadas:

$$P_i \cdot Y = Y \cdot C - P_i \cdot C = \vec{y} - \vec{p}_i$$

Donde  $\vec{p}_i$  es el vector posición del observador.

- Por lo tanto:

$$N_i \cdot \vec{y} = N_i \cdot \vec{p}_i = b_i$$

Ahora, si  $N = [N_1, N_2, \dots, N_n]$  y  $b = [b_1, b_2, \dots, b_n]$ , tendremos dos sistemas de ecuaciones:  $N \cdot \hat{x} = 0$  (sistema homogéneo) y  $N \cdot \vec{y} = b$  (sistema heterogéneo).

Para resolver este sistema de ecuaciones sobredeterminado recurrimos al método SVD: "Single Value Decomposition".

$$N = U * S * V^t$$

Donde U, S y V son matrices -S diagonal-.

La solución de  $\hat{x}$  es el vector propio (columna de la matriz V) que corresponde al mínimo valor propio de la matriz S.

La solución está dada por:

$$y = N^t * b$$

Donde:

$$N^t = V * S^{-1} * U^t$$

A partir de este método matricial encontramos el mínimo valor propio y asociándole su vector propio correspondiente encontramos el versor de la recta de intersección de los planos.

## 6 Resultados

A continuación se adjuntan una serie de tablas que incluyen la información necesaria para realizar el gráfico de la trayectoria.

Por ejemplo, en la tabla (1) se observan las posiciones de los observadores en unidades de UTM.

En la tabla (2) se incluye la solución a la ecuación heterogénea obtenida a partir del producto de matrices en el método SVD.

Posiciones (UTM) (1.0e+06)		
X	Y	Z
0.5268	61.999	0
0.5270	61.911	0
0.5346	62.183	0
0.4947	61.976	0
0.4990	62.009	0
0.4805	62.048	0
0.4804	620.46	0
0.4622	61.914	0
0.4758	62.004	0
0.5196	61.664	0
0.5124	61.804	0
0.4957	61.873	0
0.4985	61.866	0
0.4445	62.074	0
0.4523	62.151	0
0.4223	61.881	0
0.4229	61.866	0
0.3698	62.513	0
0.4066	62.234	0
0.3812	62.361	0
0.3697	62.442	0
0.4649	62.510	0
0.4677	62.515	0
0.4575	62.656	0
0.4536	62.569	0
0.4433	62.390	0

Table 1: Posiciones -UTM-

Solución Mínimos Cuadrados
$y_v$
0.4488
62.059
0.0114

Table 2: Solución Mínimos Cuadrados

Además, mediante el método SVD obtuvimos los datos para construir la recta de intersección de planos. Dichos resultados se adjuntan en las tablas (3), (4), (5). Donde la columna 3 de la matriz V se corresponde con el vector propio asociado al mínimo valor propio de la matriz S.

Matriz S -Método SVD-		
3.888	0	0
0	2.7095	0
0	0	1.882

Table 3: Matriz S

Matriz V -Método SVD-		
0.1970	-0.7672	-0.6104
0.3866	-0.5114	0.7675
0.9010	0.3872	-0.1959

Table 4: Matriz V

Recta de Intersección		
0.5098	61.292	0.0310
0.4488	62.059	0.0114
0.3877	62.827	-0.0082

Table 5: Recta de Intersección

Por último, en las tablas (6) y (7) se adjuntan los valores de las visuales construidas para cada uno de los 26 observadores. Las mismas están asociadas a las trayectorias observadas por cada uno de ellos.

A partir de estas visuales es que podemos observar que tan eficiente es el ajuste, es decir si la recta de intersección se ajusta a la intersección de los planos de manera eficiente o no.

Visual 1		
X	Y	Z
0.2173	-0.9412	0.2588
0.7084	-0.6841	0.1736
0.9792	-0.1903	0.0698
-0.0045	-0.0169	0.9998
0.3388	-0.8827	0.3256
0.1010	-0.9606	0.2588
0.1290	-0.9182	0.3746
0.0976	-0.4592	0.8829
-0.5947	-0.4646	0.6561
0.5870	-0.8079	0.0523
0.9058	0.4224	0.0349
0.5329	-0.6351	0.5592
0.4424	-0.8682	0.2250
-0.4575	0.4120	0.7880
-0.1371	-0.9752	0.1736
0.4777	0.4301	0.7660
0.7647	-0.406	0.5000
-0.1055	0.8596	0.5000
0.7061	-0.6819	0.1908
0.6938	-0.6247	0.3584
-0.0733	0.5973	0.7986
0.5610	0.8013	0.2079
0.0988	-0.3445	0.9336
-0.4603	-0.7972	0.3907
0.2991	-0.8219	0.4848
-0.0126	-0.7192	0.6947

Table 6: Visual 1

Visual 3		
X	Y	Z
-0.2273	-0.9118	0.3420
-0.7913	-0.5749	0.2079
-0.8070	-0.5864	0.0698
-0.9646	0.2585	0.0523
-0.8940	-0.3078	0.3256
-0.9779	0.1901	0.0872
-0.8188	0.4728	0.3256
0.2602	0.3330	0.9063
-0.7474	0.1050	0.6561
0.1893	-0.7064	0.6820
-0.9183	-0.3898	0.0698
-0.7930	-0.5150	0.3256
0.9004	0.3822	0.2079
-0.5131	0.8539	0.0872
-0.7708	-0.6022	0.2079
0.1504	0.9494	0.2756
-0.3541	0.8343	0.4226
-0.7290	0.6337	0.2588
-0.2755	0.9607	0.0349
-0.3216	0.9339	0.1564
-0.5864	0.7782	0.2250
-0.9666	-0.2410	0.0872
-0.9956	-0.0382	0.0872
-0.8867	0.3582	0.2924
-0.9454	0.0165	0.3256
-0.7917	0.4947	0.3584

Table 7: Visual 3

El resultado más importante de este trabajo se obtiene a partir de los gráficos finales pues es donde vemos como queda determinada la trayectoria que de hecho es lo que nos interesa.

En la figura (3) se graficaron los puntos de observación de cada testigo y la recta de mejor ajuste, sin incluir las visuales de modo que podemos observar más claramente cómo se relaciona la trayectoria con la ubicación de los observadores.

Asimismo la figura (4) muestra un gráfico más completo ahora con las visuales correspondientes a cada observador y la recta asociada a la trayectoria del cuerpo desde una perspectiva lateral.



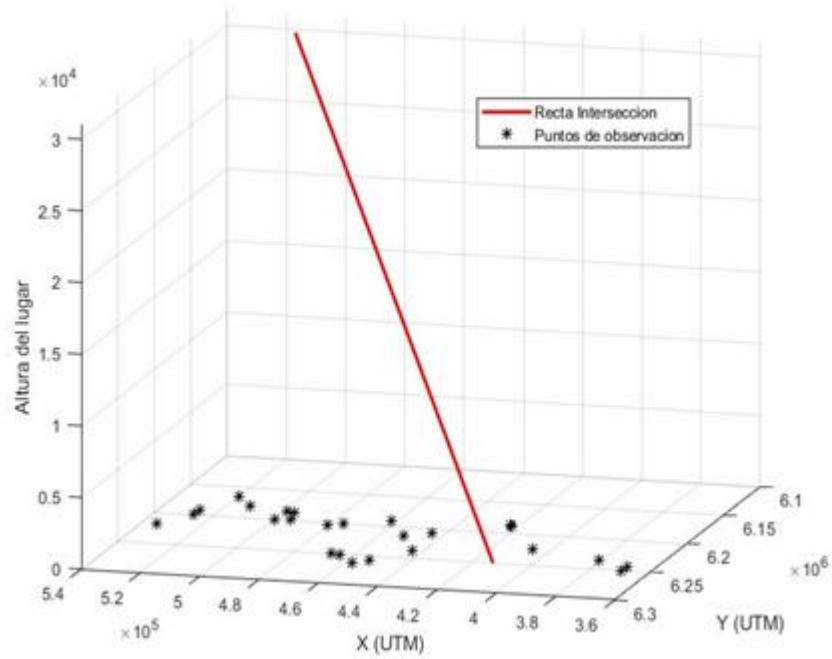


Figure 3: Gráfico de la trayectoria y la ubicación de los testigos.

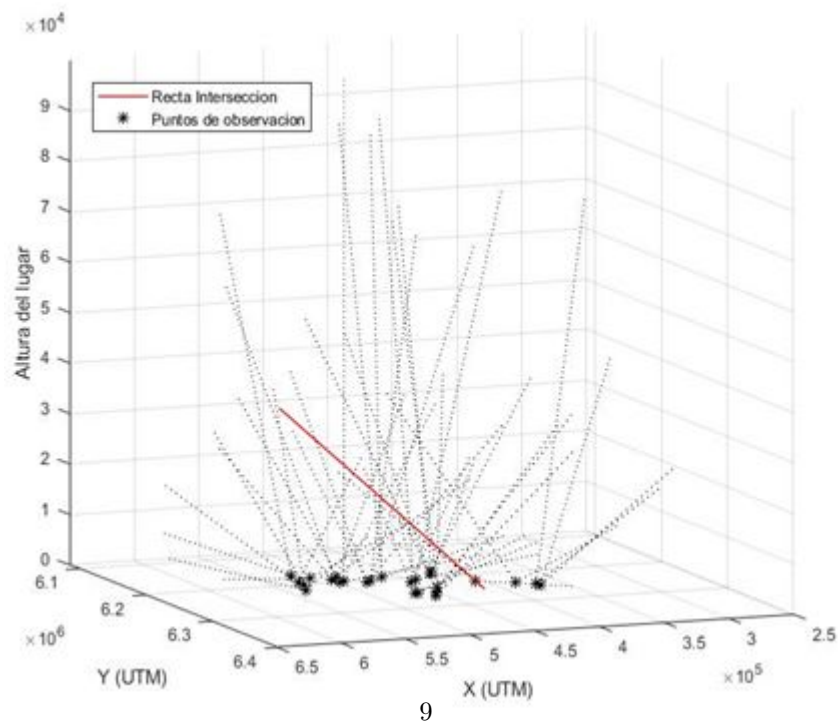


Figure 4: Gráfico de la trayectoria lateral y las visuales de cada uno de los observadores.

Por último, con la figura (5) adjuntamos un gráfico completo con una perspectiva frontal con el objetivo de mostrar que tan efectivo fue el ajuste realizado mediante el método de mínimos cuadrados. Observamos que la recta de intersección se corresponde bastante bien a la intersección de los planos.

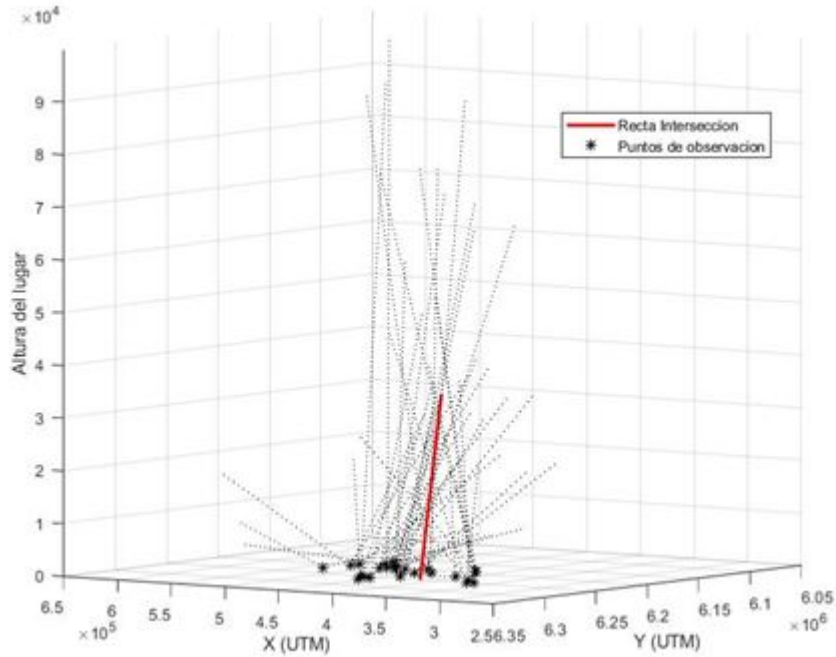


Figure 5: Gráfico de la trayectoria frontal y las visuales de cada uno de los observadores.

## References

- [1] Gonzalo Tancredi. *Informe sobre bólido luminoso observado el 4 de abril de 2005 en el sur del Uruguay*.
- [2] MATLAB. <https://la.mathworks.com/>