

# Seguridad en los recorridos de tiro con arco

## Nociones de balística aplicada

### Antecedentes

En cuanto a las consideraciones de seguridad, existe una diferencia fundamental entre las armas de fuego y el tiro con arco. Aquellas están siempre en condiciones de dispararse, voluntariamente o por accidente, salvo cuando el seguro las protege; el proyectil está siempre en condiciones de ser lanzado con la misma eficacia. Sin embargo cuando un arquero empieza a afrontar un disparo hacia una diana su arco se halla todavía desarmado. La mecánica de armar forma parte del gesto técnico que desemboca en la suelta, de forma que siempre que se abra reglamentariamente con el arco y la flecha dirigidos a la diana, el alcance de las flechas disparadas por accidente se limitará enormemente. El tiro con arco es inherentemente seguro si se toman las precauciones necesarias.

Ello no significa que no deba dedicarse una gran atención a evitar los posibles daños de flechas perdidas en condiciones reales, sino que el enfoque técnico con el que se estudiarán las eventuales zonas de peligro es radicalmente distinto.

### Tipificación de arcos y flechas

Para los estudios de situaciones reales que seguirán es importante tipificar los arcos y flechas que se usan de forma corriente en competición, con sus límites superiores prácticos de rendimiento <sup>[1,2]</sup> :

#### Reglamentos FITA Aire Libre, Sala, Campo

<u>Arco</u>	<u>Peso flecha</u>	<u>Velocidad</u>
Poleas 60 Lbs	330 gr	270 fps
Recurvo 40 Lbs	280 gr	210 fps

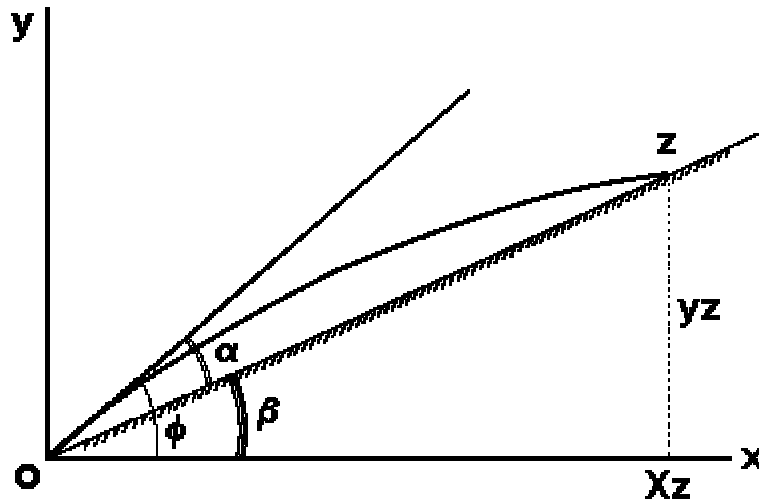
#### Reglamentos RFETA Bosque 2D y 3D

<u>Arco</u>	<u>Peso flecha</u>	<u>Velocidad</u>
Poleas 70 Lbs	350 gr	300 fps
Recurvo 50 Lbs	400 gr	200 fps
Recto 60 Lbs	500 gr	180 fps

*Tabla I*

## Balística en el vacío

En el supuesto ideal en que las flechas no se vieran frenadas por el aire, su trayectoria correspondería a una parábola simétrica como la de la figura <sup>[3]</sup> :



*Figura 1 : Trayectoria de un proyectil en el vacío*

Donde la distancia de impacto de una flecha lanzada en una elevación  $\alpha$  sobre un terreno en pendiente con un ángulo  $\beta$ , a una velocidad inicial  $V_0$ , se obtiene de :

$$(I) \quad OZ := \frac{2 \cdot V_0^2 \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\alpha)}{9.81 \cdot \cos^2(\beta)}$$

Impacto que ocurre a una distancia horizontal  $Xz$  del origen cuyo valor es :

$$(II) \quad Xz := \frac{2 \cdot V_0^2 \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\alpha)}{9.81 \cdot \cos(\beta)}$$

Mas allá del valor de estos datos sobre el punto de impacto, dadas las condiciones del disparo, podemos trazar la trayectoria entera de esta supuesta flecha en una simple hoja de cálculo, de forma que en cada fila sucesiva se contengan los datos del siguiente punto de la trayectoria hasta su impacto final.

Partiendo del punto  $X=X_0$ ,  $Y=Y_0$ , y para cada incremento de abscisa  $\Delta x$ , podemos determinar el siguiente punto de la trayectoria como <sup>[4]</sup> :

$$(III) \quad x_{i+1} := x_i + \Delta x$$

$$(IV) \quad \Delta t := \frac{\Delta x}{V_{x_0}} \quad t_{i+1} := t_i + \Delta t$$

$$(V) \quad y_{i+1} := y_0 + V_{y_0} \cdot t_{i+1} - \frac{1}{2} \cdot 9.81 \cdot t_{i+1}^2 - V_{x_0} \cdot t_{i+1} \cdot \tan(\beta)$$

donde el tercer término corrige la ordenada respecto la inclinación del terreno, de tal forma que para  $X=X_z$ ,  $Y$  sea 0 en su impacto contra el suelo.

Otros datos de interés para cada punto de la trayectoria son la velocidad del proyectil, y sus componentes horizontal  $V_x$  y vertical  $V_y$  :

$$(VI) \quad V_{y_0} := V_0 \cdot \sin(\phi) \quad V_{x_0} := V_0 \cdot \cos(\phi)$$

$$(VII) \quad V_{y_{i+1}} := V_{y_i} - 9.81 \cdot \Delta t$$

$$(VIII) \quad V_{i+1} := \sqrt{V_{x_0}^2 + V_{y_{i+1}}^2}$$

y el ángulo de la flecha (trayectoria) respecto la horizontal :

$$(IX) \quad \theta_{i+1} := \frac{V_{y_{i+1}}}{V_{x_0}}$$

Todo ello se recoge en una hoja de cálculo como la siguiente :

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																
25																
26																
27																
28																
29																
30																
31																
32																
33																
34																
35																
36																
37																
38																
39																
40																
41																

Velocidad (fps)	270
Velocidad (m/s)	82,296
Elev. mira (°)	1,216
Elev. terr. (°)	-30

**Alcance X**  
29,30

Trayectoria de una flecha a 270 fps, sin fricción, disparada a una elevación de 1,216°, sobre un terreno que presenta una inclinación de -30°.

Elev. tot. (°)	-28,784
Vx (fps)	236,6392
Vy (fps)	-130,007

Delta Dx (m)	2
--------------	---

D (m)	X (m)	X (Yds)	V	Vx (fps)	Vy (fps)	Inclinación (°)	Inclinación (m/m)	Tiempo (sec)	Y (")	Y (cm)	Elev. mira
0,0	0	0,0	270	236,6	-130,0	-28,78	-1,8	0,0000	0,0	0,0	
2,3	2	2,2	270	236,6	-130,9	-28,95	-1,8	0,0277	2,1	5,2	
4,6	4	4,4	270	236,6	-131,8	-29,11	-1,8	0,0555	3,8	9,7	
6,9	6	6,6	271	236,6	-132,7	-29,28	-1,8	0,0832	5,3	13,4	
9,2	8	8,7	271	236,6	-133,6	-29,44	-1,8	0,1109	6,4	16,3	
11,5	10	10,9	272	236,6	-134,5	-29,61	-1,8	0,1386	7,3	18,5	0,415
13,9	12	13,1	272	236,6	-135,4	-29,77	-1,7	0,1664	7,9	20,0	

0,413

**Ecuaciones usadas en cada fila de la trayectoria**

D (m)	$B21 = C21 / \cos(\$F\$6 / 180 * \pi ())$
Dx (m)	$C21 = C20 + \$F\$12$
Dx (Yds)	$D21 = C21 / 0,9144$
V	$E21 = \text{RAIZ}(F20^2 + G20^2)$
Vx (fps)	$F21 = F20$
Vy (fps)	$G21 = \$F\$10 - 32,185 * J21$
Inclinación (°)	$H21 = \text{ATAN}(G21 / F21) * (180 / \pi ())$
Inclinación (m/m)	$I21 = 1 / \text{TAN}(H21 / 180 * \pi ())$
Tiempo (sec)	$J21 = D21 * 3 / \$F\$9$
Y (")	$K21 = 12 * (\$F\$10 * J21 - 0,5 * 32,185 * J21^2) - \text{TAN}(\$F\$6 * \pi () / 180) * D21 * 36$
Caiguda neta (cm)	$L21 = K21 * 2,54$
Elev mira en horizontal	$M21 = 0,5 * \text{ASENO}(9,81 * C21 / \$F\$4^2) * 180 / \pi ()$
Elev mira pendiente	$O21 = \text{ASENO}(9,81 * C21 * \cos(\$F\$6 / 180 * \pi ()) / (2 * \$F\$4^2 * \cos((M21 + \$F\$6) / 180 * \pi ()))) * 180 / \pi ()$

Figura 2: Hoja de cálculo de trayectorias y alzas.

Extendiendo las filas de la trayectoria hasta colmar la distancia deseada.

## Balística real en la atmósfera

En condiciones reales la flecha se ve sometida a la fricción con el aire, que por una parte estabiliza su vuelo disponiéndola colinealmente a la trayectoria, y por otra la va frenando hasta su impacto final.

Se ha estudiado muy intensamente el efecto de fricción de la atmósfera sobre los proyectiles habituales de las armas de fuego y se ha determinado que la fuerza de fricción depende de la velocidad del proyectil. A mayor velocidad mayor fuerza fricción. La forma de esta dependencia no puede establecerse de una forma general pues depende de multitud de factores difíciles de medir objetivamente. Se recurre en cambio a estudiar exhaustivamente proyectiles que pueden considerarse estándar por sus características, de una forma experimental con cronógrafos o péndulos balísticos, para utilizar su comportamiento como modelo. Este se traslada a otros proyectiles parecidos aplicando un coeficiente balístico ( $C_0$ ), un coeficiente aerodinámico ( $C_x$ ) y/o un factor de forma ( $i$ ), sobre dicho comportamiento <sup>[5]</sup>.

A título de ejemplo, el proyectil de la tabla G1 de Lowry, uno de los más utilizados como modelo para proyectiles corrientes de fusiles y armas cortas, nos muestra como los proyectiles veloces se ven fuertemente frenados por la acción de la atmósfera <sup>[6]</sup> :

<u>Espacio recorrido (ft)</u>	<u>Velocidad (m/s)</u>
0	1341
1000	1210
2000	1090
3000	980
4000	882
5000	789
6000	701
7000	620

*Tabla II*

Para velocidades más modestas como las que nos ocupan al tratar de arcos y flechas, la fuerza de fricción puede expresarse como una función del tipo <sup>[7]</sup> :

$$(X) \quad R_f := K \cdot V^2$$

Donde  $K$  es una constante del orden de  $10^{-6}$  en el sistema métrico decimal (MKS), que puede determinarse experimentalmente, o de una forma aproximada a partir de las características de la flecha. Con esta ley de fricción se pueden obtener las aceleraciones que actuarán sobre la flecha debido a esta fuerza como :

$$(XI) \quad a_{fx} := -Rf \cdot \frac{v_x}{V} \cdot \frac{9.81}{p} \quad a_{fy} := -Rf \cdot \frac{v_y}{V} \cdot \frac{9.81}{p}$$

donde  $p$  es el peso de la flecha con todos sus componentes.

La resolución precisa de una trayectoria en estas condiciones exige el uso de métodos numéricos de integración de ecuaciones diferenciales, usualmente el Runge-Kutta de cuarto orden, con una densidad mínima del orden de cien puntos por segundo, que quedan fuera del alcance de una simple hoja de cálculo.

De los trabajos publicados pueden extraerse los siguientes datos experimentales <sup>[8]</sup> :

Peso (gr)	V1 (fps)	V2 (fps)	d (ft)	Rf (Lbs)
430.5	155.4	141.8	150	0.0257
595.7	138.5	131.4	120	0.0210

*Tabla III*

donde la columna  $d$  expresa la distancia en pies entre los puntos en que se midió la velocidad de la flecha, y  $Rf$  la fuerza de fricción promedio en libras que corresponde al tramo medido.

De cálculos precisos sobre las velocidades típicas para cada tipo de arco de la *tabla I*, puede verse la reducción de velocidad a los 100 metros de recorrido :

Peso	d	L	Pluma	l	h	Vo	V100	%rd
330	6.5	73	Plástico	50	5	270	245.2	9.2
280	6	73	Plástico	50	5	210	189.2	9.9
350	6.5	73	Plástico	50	5	300	273.9	8.7
400	8.3	73	Natural	74	15	200	158.9	20.6
500	9	73	Natural	100	20	180	134.9	25.0

*Tabla IV*

donde se indican las características de la flecha :  $d$  diámetro en mm,  $L$  longitud en cm,  $l$  longitud de la pluma en mm,  $h$  altura de la pluma en mm,  $V_0$  velocidad inicial,  $V_{100}$  velocidad a los 100 metros, y  $rd$  tanto por ciento de reducción. La mayor pérdida de velocidad en los casos 4 y 5 se debe a las dimensiones y características de las plumas usualmente empleadas.

A los efectos que interesa en el cálculo de las zonas de seguridad en polígonos o en recorridos de tiro con arco, será mas que suficiente lo que nos aporten los cálculos en ausencia de fricción tomando como velocidad, la tabulada menos 10 fps para los casos 1 a 3, o menos 20 para los 4 y 5. Si interesan calculos mas precisos deberá recurrirse a los métodos numéricos reseñados.

### Alcance de flechas perdidas <sup>[9-13]</sup>

Operando en condiciones reglamentarias se estima que la desviación de una flecha perdida por defecto de suelta, o por accidente, será como máximo del orden de 1 a 2 grados para los arcos de tipo 1, 2 y 3, y que puede llegar a los 3 grados para los tipos 4 y 5. Tirando sobre una diana a 60 metros, máxima distancia reglamentaria en tiro de campo, este error situa las flechas perdidas entre 90 y 100 metros de la piqueta de tiro, y en una amplitud de 3 metros a parte y parte del centro. Tirando a 45 metros, máxima distancia en tiro en 3D, el alcance va de los 75 a los 90 metros, y la amplitud se reduce a 2.5 metros a lado y lado. Si el tiro es a 30 metros el alcance se situa entre 65 y 80 metros, y la amplitud es de 1.5 metros por lado. A estas posibles desviaciones laterales le añadiremos la amplitud del parapeto, y consideraremos su proyección al máximo alcance. Así  $3+1+3 = 7$  metros a 60 metros de distancia, equivale a 11.7 metros a 100 metros de la piqueta de tiro.

En condiciones generales, para tiros reglamentarios sobre un terreno horizontal que no favorezca la dispesión de los eventuales rebotes, bastará considerar un polígono de seguridad como el de la figura siguiente :

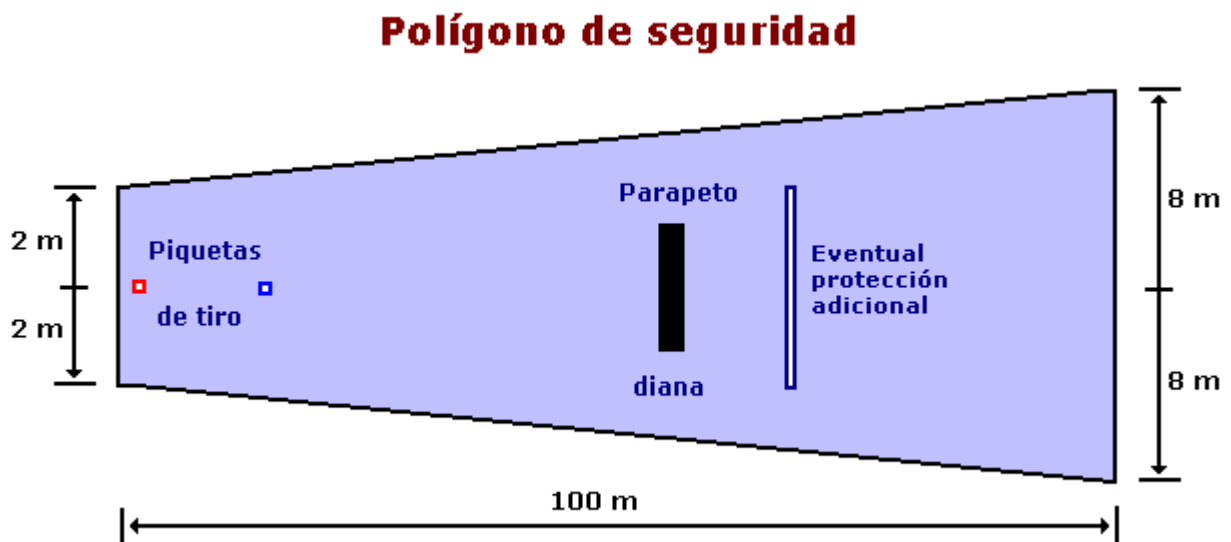
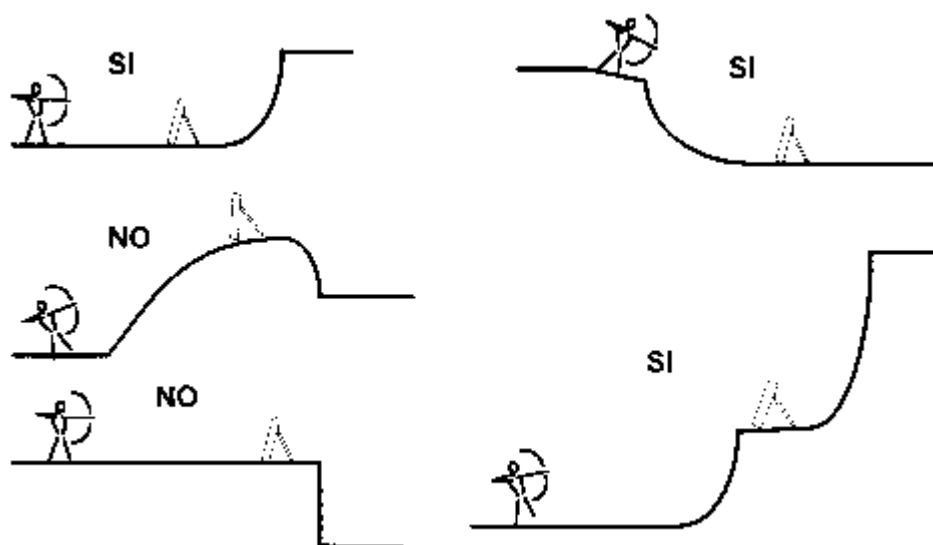


Figura 3: Polígono de seguridad en recorridos de tiro con arco

en el que se ha tenido en cuenta que pueda haber dos tiradores simultáneamente en la zona de tiro y una amplitud razonable para cubrir rebotes no dispersos.

La orografía y condiciones del terreno permitirán que esta zona se recorte sensiblemente o que por el contrario deba extenderse suficientemente. Se estudiarán los obstáculos naturales que contribuyan a ello :



*Figura 4 : Obstáculos naturales en la orografía del terreno*

Para delimitar zonas dudosas deberá recurrirse a los cálculos necesarios.

En tiro 3D donde las posibilidades de flechas perdidas y/o de rebotes son mayores deberá tenerse mayor propensión a favorecer los obstáculos naturales o las eventuales protecciones adicionales tras la diana, intentando no perjudicar el espíritu de la disciplina que persigue recrear figuras de animales en un entorno natural.

No hay zonas de tiro seguras o peligrosas por definición, el grado de seguridad dependerá de la integración del polígono que se asigne a una diana en su entorno, y de como pueda prevenirse la penetración de accesos a estos polígonos, o su eventual solapamiento.



## Homologación de recorridos

La homologación de un recorrido de tiro con arco requerirá los siguientes pasos :

- 1 - Localizar correctamente las piquetas de tiro, el parapeto, y la orientación del tiro en cada diana del recorrido.
- 2 - Asignación de polígonos de seguridad a cada diana del recorrido, mediante mediciones y cálculos cuando sea necesario.
- 3 - Asegurar que no se produzcan solapamientos entre polígonos.
- 4 - Asegurar una señalización suficiente, y que se eviten accesos que puedan penetrar algún polígono de seguridad.

Siempre que sea posible puede delimitarse la zona sobre la que pueden moverse las piquetas de tiro en cada diana del recorrido, aunque esto puede requerir un trabajo excesivo. Cuando en un recorrido el organizador mueva una piqueta de tiro fuera de las zonas delimitadas deberá procederse a su homologación.

La Federación proveerá una lista de los técnicos cualificados para llevar a cabo esta labor.

## Referencias

- [1] - International Archery Federation (FITA) "Constitution & Rules", 1st April, 2002  
<http://www.archery.org/>
- [2] - Real Federación Española de Tiro con Arco, "Reglamento de Recorrido de Bosque", Enero 2002, <http://www.federarco.es/>
- [3] - Edoardo Mori, "Balistica Esterna nel Vuoto", <http://www.earmi.it/balistica/vuoto.htm>
- [4] - Andrew Middleton, "Bow Ballistics", September 2001,  
<http://www.monsterworks.net/computerstufh/ballistics.htm>
- [5] - E. Mori, C. Palazzini, "Elementi di Balistica", [www.studionet.it/mori](http://www.studionet.it/mori)
- [6] - E. Mori, "Le Tavole di Ritardazione, Tavola di Lowry G1",  
<http://www.earmi.it/balistica.lovry.htm>
- [7] - W.J. Rheingans, "Exterior Ballistics of Bows and Arrows",  
[http://home.att.net/sajackson/Archery\\_Physics.html](http://home.att.net/sajackson/Archery_Physics.html)
- [8] - English, "Exterior Ballistics of Arrows", J. Franklin Institute, Dec. 1930
- [9] - "Recommandations pour l'Implantation de Parcours", Fédération Française de Tir à l'Arc, Janvier 2000, <http://www.fft.fr/>
- [10] - "Norme per la Sicurezza dei Campi di Tiro alla Targa", Circ. 22/2002 29.03.02, Federazione Italiana di Tiro all'Arco, <http://www.fitarco.it/>
- [11] - "Archery and Bowhunter Range Guidelines", AMO, Field Publication FP-4, 2000
- [12] - Paul H. Davidson, "NFAA and IFA Archery and Bowhunter Range Guidelines", May 2000
- [13] - Règlement de sécurité de la Fédération de Tir à l'Arc du Québec, FTAQ, Juin 2000

Borrador 02.01.03

Josep Gregori