

- (38) Rosenbluth, M.N., **Symp. on Plasma**, ed. F. Clauser, Addison Wesley, 1960.
- (39) Artisimovich, L.A., **Controlled Thermonuclear Reactions**, Gordon and Breach, New York, 1964.
- (40) Boyd, J.T., Sanderson, J.J., **Plasma Dynamics**, Barnes and Noble, New York, 1969.

7. Apéndice 1

7.1. Esquema de Diferencias para el Método Implícito

$$A_{i,j,n+1} = A_{i,j,n} - PT - ST - TT + CT$$

donde:

$$PT = VX(i, j) (A_{i+1,j,n} - A_{i,j,n}) \alpha$$

$$ST = VY(i, j) (A_{i,j+1,n} - A_{i,j,n}) \beta$$

$$TT = \gamma (A_{i+1,j,n} - 2A_{i,j,n} + A_{i-1,j,n})$$

$$CT = \varepsilon (A_{i,j+1,n} - 2A_{i,j,n} + A_{i,j-1,n})$$

con:

$$\alpha = \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad , \quad \beta = \frac{\Delta t}{\Delta y}$$

$$\gamma = \eta \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad y \quad \varepsilon = \eta \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2}$$

8. Apéndice 2

8.1. Esquema de Diferencias para el Método del Promedio Ponderado

para j fijo:

$$\begin{aligned}
b_0 &= b_i = 1 + VX(i, j) \alpha + 2 \eta \theta \gamma \\
d_0 &= (VY(i, j) \alpha + \eta \varepsilon) A_{0,j+1,n} + (1 - VY(i, j) \beta - 2 \eta \varepsilon) A_{0,j,n} + \eta \varepsilon A_{0,j-1,n} + \\
&\quad \eta (1 - \theta) \gamma (A_{NX+1,j,n} - 2 A_{i,j,n} + A_{i+1,j,n}) + \eta \theta \gamma A_{NX+1,j,n} \\
a_i &= \eta \theta \gamma \\
c_i &= VX(i, j) \alpha + \eta \theta \gamma \\
d_i &= (VY(i, j) \beta + \eta \varepsilon) A_{i,j+1,n} + (1 - VY(i, j) \beta - 2 \eta \varepsilon) A_{i,j,n} + \eta \gamma A_{i,j-1,n} + \\
&\quad \eta (1 - \theta) \gamma (A_{i-1,j,n} - 2 A_{i,j,n} + A_{i+1,j,n})
\end{aligned}$$

entonces:

$$d_0 = d_i(i=0) + \eta \theta \gamma A_{i-1,j,n}$$

y

$$d_{NX} = d_i(i=NX) + (VX(i, j) \alpha + \eta \theta \gamma) A_{i+1,j,n}$$

para i fijo:

$$\begin{aligned}
b_j &= 1 + 2 \eta \theta \varepsilon \\
a_j &= \eta \theta \varepsilon \\
c_j &= \eta \theta \varepsilon \\
d_j &= (VX(i, j) \alpha + \eta \theta \gamma) A_{i+1,j,n+1} - (VX(i, j) \alpha + 2 \eta \theta \gamma) A_{i,j,n+1} + \eta \gamma A_{i-1,j,n+1} + \\
&\quad (VY(i, j) \alpha + \eta (1 - \theta) \gamma) A_{i,j+1,n} + (1 - VY(i, j) \alpha - 2 \eta (1 - \theta) \gamma) A_{i,j,n} + \\
&\quad \eta (1 - \theta) \gamma A_{i,j-1,n} + \eta (1 - \theta) \gamma (A_{i-1,j,n} - 2 A_{i,j,n} + A_{i+1,j,n}) \\
d_1 &= d_j(j=1) + \eta \theta \varepsilon A_{i,0,n} \\
d_{NY-1} &= d_j(j=NY-1) + \eta \theta \varepsilon A_{i,NY,n}
\end{aligned}$$

con:

$$\begin{aligned}
NX &= \frac{1}{\Delta x} \quad y \quad NY = \frac{1}{\Delta y} \\
\alpha &= \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad ; \quad \beta = \frac{\Delta t}{\Delta y} \\
\gamma &= \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad y \quad \varepsilon = \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2}
\end{aligned}$$

9. Apéndice 3

9.1. Esquema de Diferencias para el Método de Direcciones Alternantes

para i fijo:

$$\alpha_0 = b_0 = 1 + VY(i, j) \beta + 2 \eta \varepsilon$$

$$c_j = VY(i, j) \beta + \eta \varepsilon$$

$$d_0 = S_0 = (VX(i, j) \alpha + \eta \gamma) A_{i+1,0,n+1} + (1 - VX(i, j) \alpha - 2 \eta \gamma + \eta \varepsilon) A_{i,0,n+1} + \eta \gamma A_{i-1,0,n+1}$$

$$b_0 = b_j = 1 + VY(i, j) \beta + 2 \eta \varepsilon$$

$$d_j = (VX(i, j) \alpha + \eta \gamma) A_{i+1,j,n+1} + (1 - VX(i, j) \alpha - 2 \eta \gamma) A_{i,j,n+1} + \eta \gamma A_{i-1,j,n+1}$$

$$a_j = \eta \varepsilon$$

$$d_{NY} = d_j(j = NY) + (VX(I, J) \beta + \eta \varepsilon) A_{i,NY,n+1}$$

$$\alpha_j = b_j - \frac{a_j}{\alpha_{j-1}} c_{j-1}$$

$$S_j = d_j - \frac{a_j}{\alpha_{j-1}} S_{j-1} \quad (\text{para } j = 1, 2, \dots, NY - 1)$$

$$A_{i,NY,n+2} = \frac{S_{NY}}{\alpha_{NY}}$$

y

$$A_{i,j,n+2} = \frac{(S_j + c_j A_{i,j+1,n+2})}{\alpha_j} \quad (\text{para } j = NY - 1, NY - 2, \dots, 0)$$

para j fijo:

$$\alpha_0 = b_0 = 1 + VX(I, J) \alpha + 2 \eta \gamma$$

$$c_i = VX(i, j) \alpha + \eta \gamma$$

$$d_0 = S_0 = \eta \gamma A_{NX-1,j,n} + (VY(i, j) \beta + \eta \varepsilon) A_{0,j+1,n} +$$

$$(1 - VY(i, j) \beta - 2 \eta \varepsilon) A_{0,j,n} + \eta \varepsilon A_{0,j-1,n}$$

$$b_0 = b_i = 1 + VX(i, j) \alpha + 2 \eta \gamma$$

$$d_i = (VY(i, j) \beta + \eta \varepsilon) A_{i,j+1,n} + (1 - VY(i, j) \beta - 2 \eta \varepsilon) A_{i,j,n} + \eta \varepsilon A_{i,j-1,n}$$

$$d_0 = d_i(i = 0) + \eta \gamma A_{NX-1,j,n}$$

$$d_{NX} = d_i(i = NX) + (VX(i, j) \alpha + \eta \gamma) A_{i,j,n}$$

$$a_i = \eta \gamma$$

$$\alpha = b_i - \frac{a_i}{\alpha_i} c_{i-1} \quad (\text{para } i = 1, 2, \dots, NX)$$

$$S_i = d_i + \frac{a_i}{\alpha_{i-1}} S_{i-1} \quad (\text{para } i = 1, 2, \dots, NX - 1)$$

$$A_{NX,j,n+1} = \frac{S_{NX}}{\alpha_{NX}}$$

$$A_{i,j,n+1} = \frac{(S_i + c_i A_{i+1,j,n+1})}{\alpha_i} \quad (\text{para } i = NX - 1, NX - 2, \dots, 0)$$

con :

$$\alpha = \frac{\Delta t}{\Delta x}, \quad \beta = \frac{\Delta t}{\Delta y}$$

y

$$\gamma = \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad \text{y} \quad \varepsilon = \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2}$$

Las definiciones de los parámetros α y S son similares para el Esquema del Apéndice 2.

10. Apéndice 4

10.1. Esquema de Diferencias para el Método Convectivo

Para el cálculo del potencial vectorial :

$$A_{i,j,n+1} = \frac{(TA) A_{i,j,n} + TB + TC + TD}{TE}$$

donde:

$$TA = 1 - (VX(i-1, j) \alpha + VY(i, j-1) \beta) + (\gamma + \varepsilon)$$

$$TB = VX(i-1, j) (8 A_{i-1,j,n+1/2} - A_{i-2,j,n+1}) - VX(i+1, j) (8 A_{i+1,j,n+1/2} - A_{i+2,j,n}) \\ + 2 (\delta_y A_{i-1,j,n+1/2} \delta_y VX(i-1, j) - \delta_y A_{i+1,j,n+1/2} \delta_y VX(i+1, j)) \alpha$$

$$TC = VY(i, j-1) (8 A_{i,j-1,n+1/2} - A_{i,j-2,n+1}) - VY(i, j+1) (8 A_{i,j+1,n+1/2} - A_{i,j+2,n}) \\ + 2 (\delta_x A_{i,j-1,n+1/2} \delta_x VY(i, j-1) - \delta_x A_{i,j+1,n+1/2} \delta_x VY(i, j+1)) \beta$$

$$TD = (A_{i+1,j,n+1/2} + A_{i-1,j,n+1}) \gamma + (A_{i,j+1,n+1/2} + A_{i,j-1,n+1/2}) \varepsilon$$

y

$$TE = 1 - (VX(i-1, j) \alpha + VY(i, j-1) \beta) - (\gamma + \varepsilon)$$

Para el cálculo de las componentes del campo magnético:

$$BY_{i,j,n+1} = \frac{(SA) BY_{i,j,n} + SB + SC + SD}{SE}$$

con:

$$SA = 1 - (VX(i-1, j))^y \alpha + VY(i+1, j)^x \beta - (\gamma + \varepsilon)$$

$$\begin{aligned} SB = & - VX(i+1, j)^y (8 BY_{i+1, j, n+1/2} - BY_{i+2, j, n}) \\ & - VX(i-1, j)^y (8 BY_{i-1, j, n+1/2} - BY_{i-2, j, n+1}) \\ & - 8 (VY(i+1, j)^x BX_{i+1, j, n+1/2} - VY(i-1, j)^x BX_{i-1, j, n+1/2}) \\ & + (VY(i+1, j)^x - VY(i-1, j)^x) (BX_{i-1, j-1, n+1} + BX_{i+1, j+1, n}) \alpha \end{aligned}$$

$$SC = - (VY(i+1, j)^x BY_{i, j-2, n+1} - VY(i-1, j)^x BY_{i, j+2, n}) \beta$$

$$SD = (BX_{i+1, j, n+1/2} + BX_{i-1, j, n+1/2}) \gamma + (BX_{i, j+1, n+1/2} + BX_{i, j-1, n+1/2}) \varepsilon$$

$$SE = 1 - (VX(i+1, j))^y \alpha + VY(i, j+1)^x \beta - (\gamma + \varepsilon)$$

y a partir de $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ se calcula la otra componente del campo magnético:

$$BX_{i, j, n+1} = BX_{i-2, j, n+1} + \frac{\Delta x}{\Delta y} (BY_{i-1, j-1, n+1} - BY_{i-1, j+1, n+1})$$

con:

$$\alpha = \frac{\Delta t}{12\Delta x} \quad , \quad \beta = \frac{\Delta t}{12\Delta y}$$

$$\gamma = \eta \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad y \quad \varepsilon = \eta \frac{\Delta t}{\Delta y^2}$$

y los operadores:

$$\delta_x A_{i, j, n+1/2} = \frac{1}{4} (A_{i+2, j, n+1/2} - A_{i-2, j, n+1/2})$$

y

$$\delta_y A_{i, j, n+1/2} = \frac{1}{4} (A_{i, j+2, n+1/2} - A_{i, j-2, n+1/2})$$

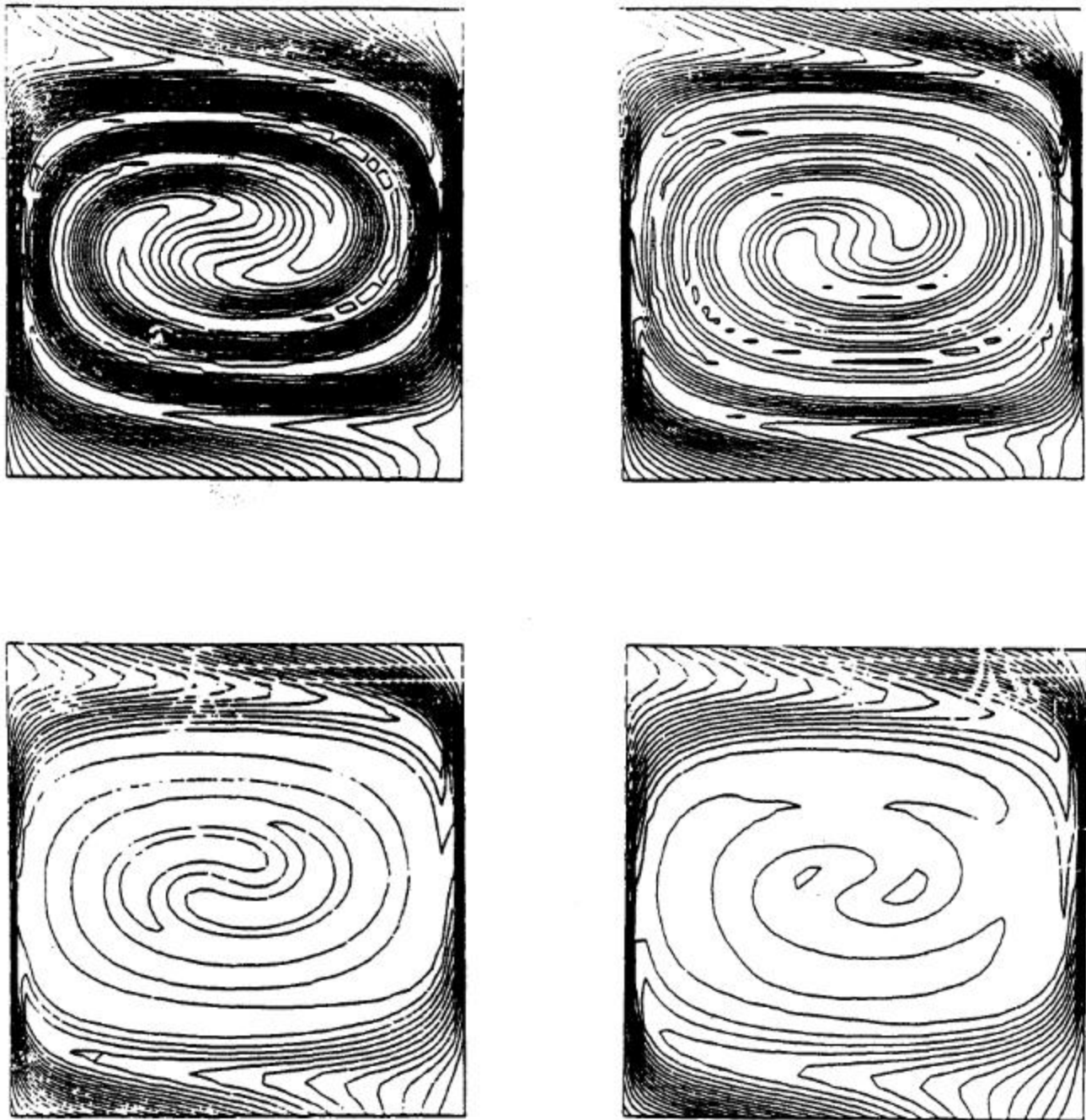


Figura 3.4.1 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 1000$ y $m = 1,00$. Para $t = 2, 3, 4, 5$.

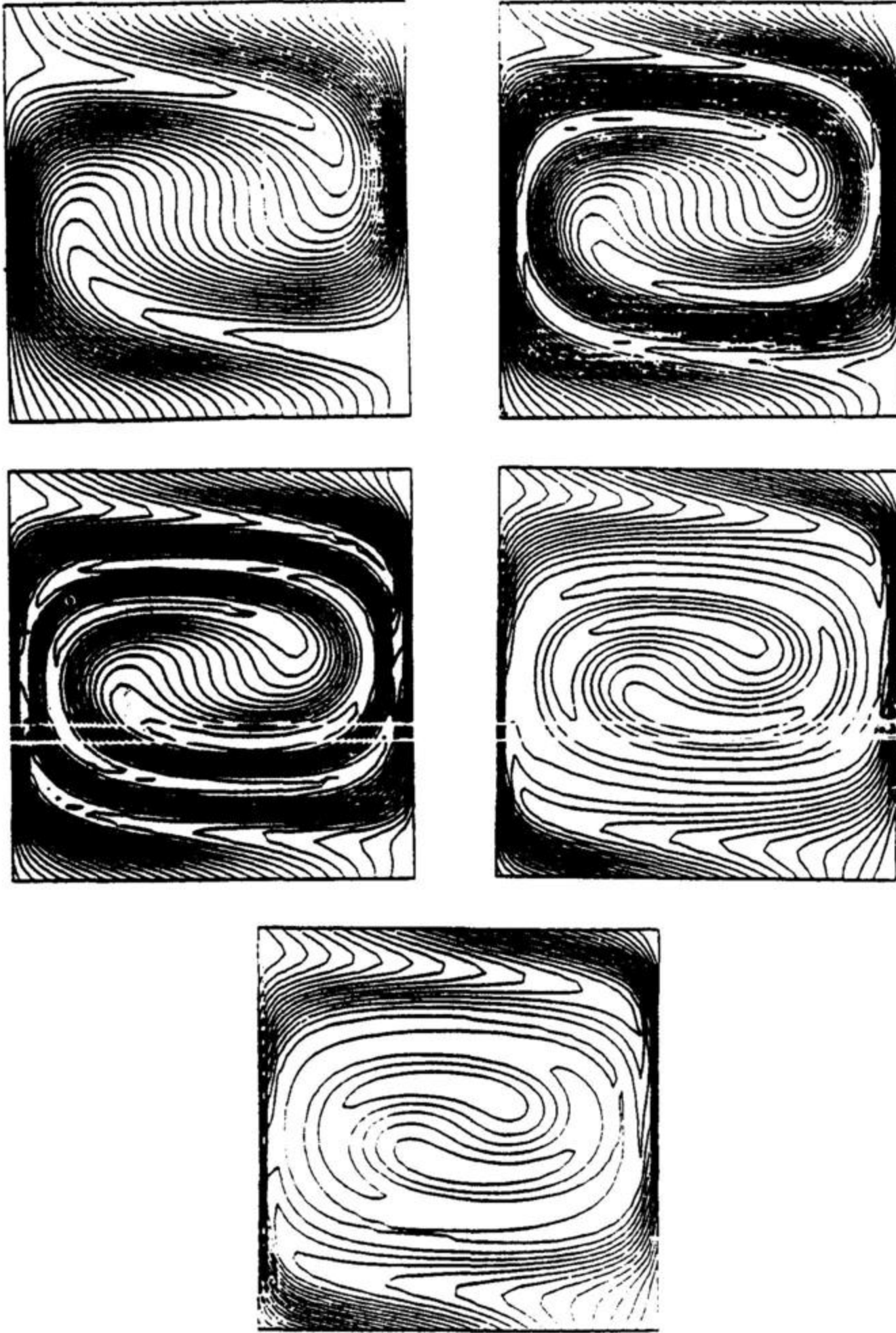


Figura 3.4.2 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 1000$ y $m = 0,70$. Para $t = 1, 3, 5, 6$.

Fig
3, 5, 8.

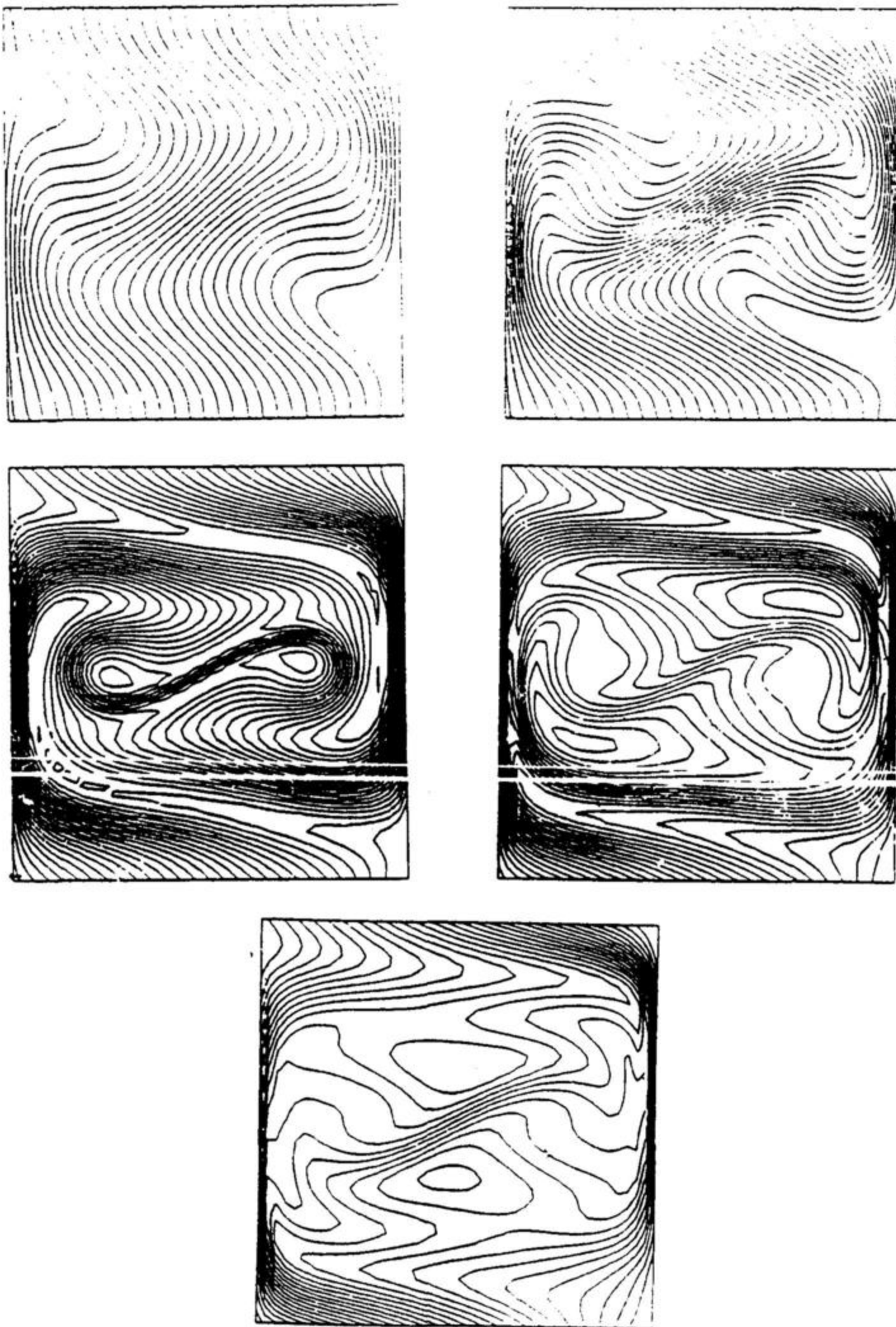


Figura 3.4.3 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 1000$ y $m = 0,30$. Para $t = .5, 1, 3, 5, 8$.

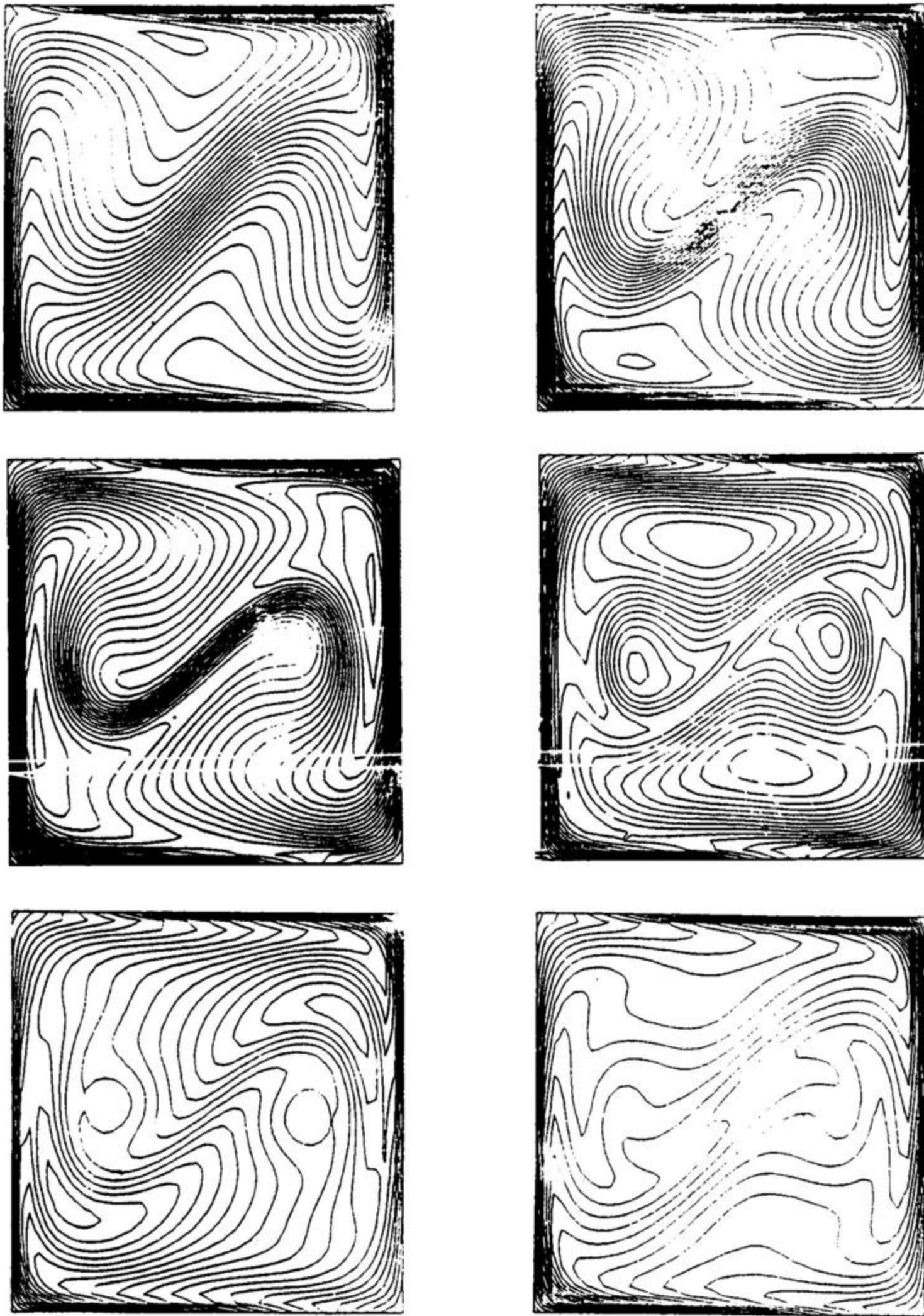


Figura 3.4.4 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 1000$ y $m = 0,10$. Para $t = .5, 1, 1.5, 3, 4.5, 5$.

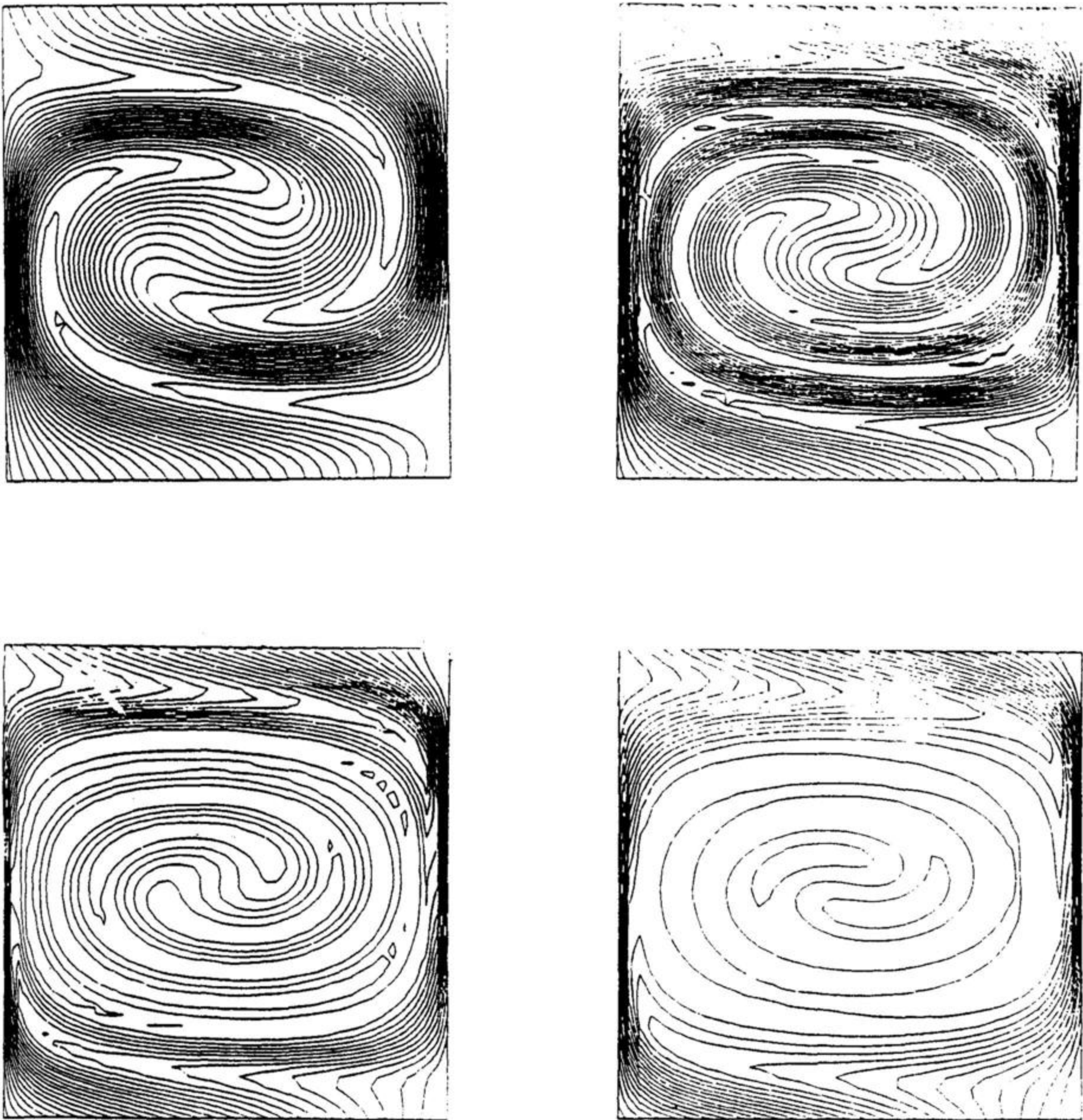


Figura 3.4.5 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 800$ y $m = 1,00$. Para $t = 1, 2, 3,$

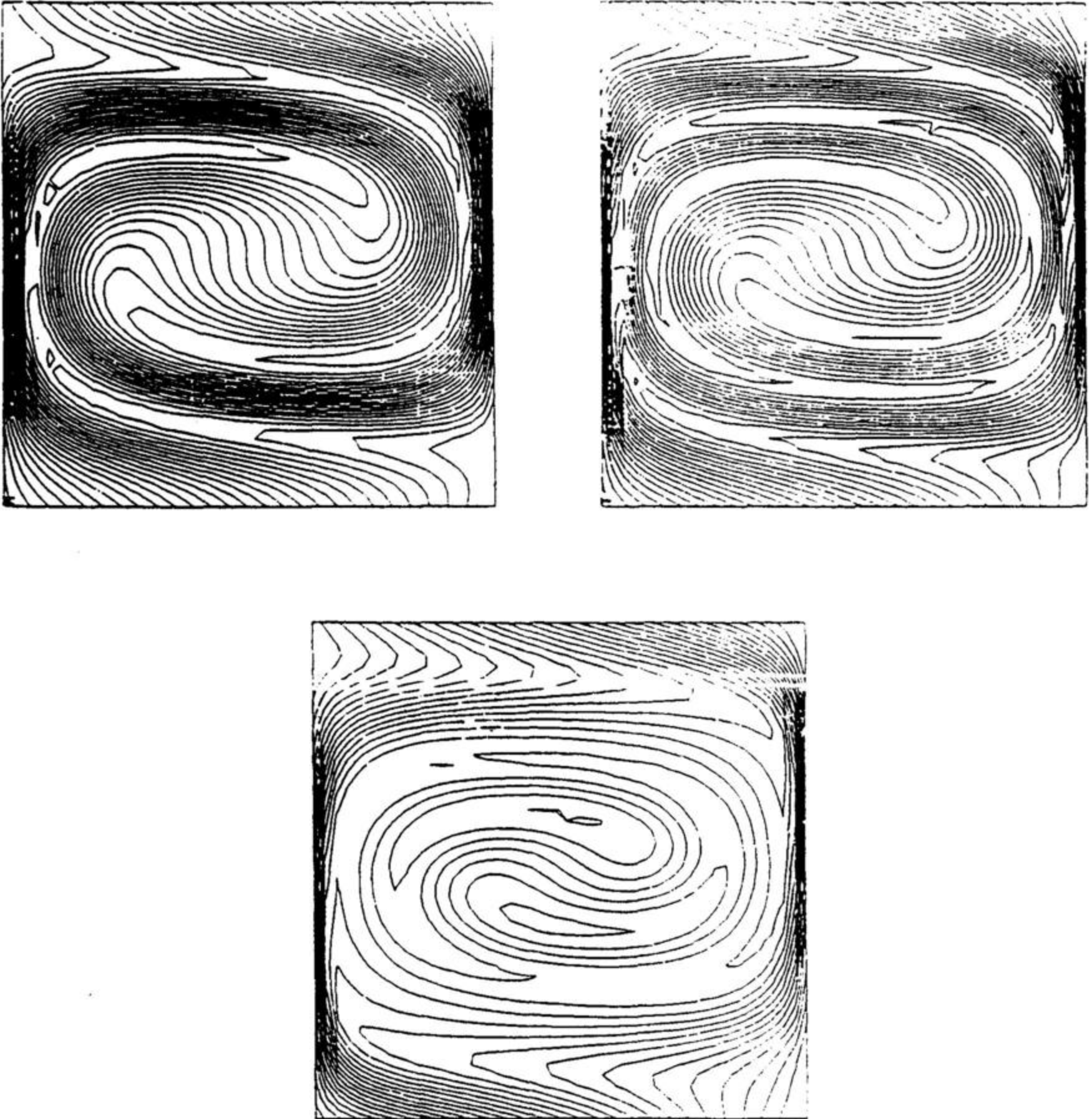


Figura 3.4.6 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 1000$ y $m = 0,70$. Para $t = 2, 3,$

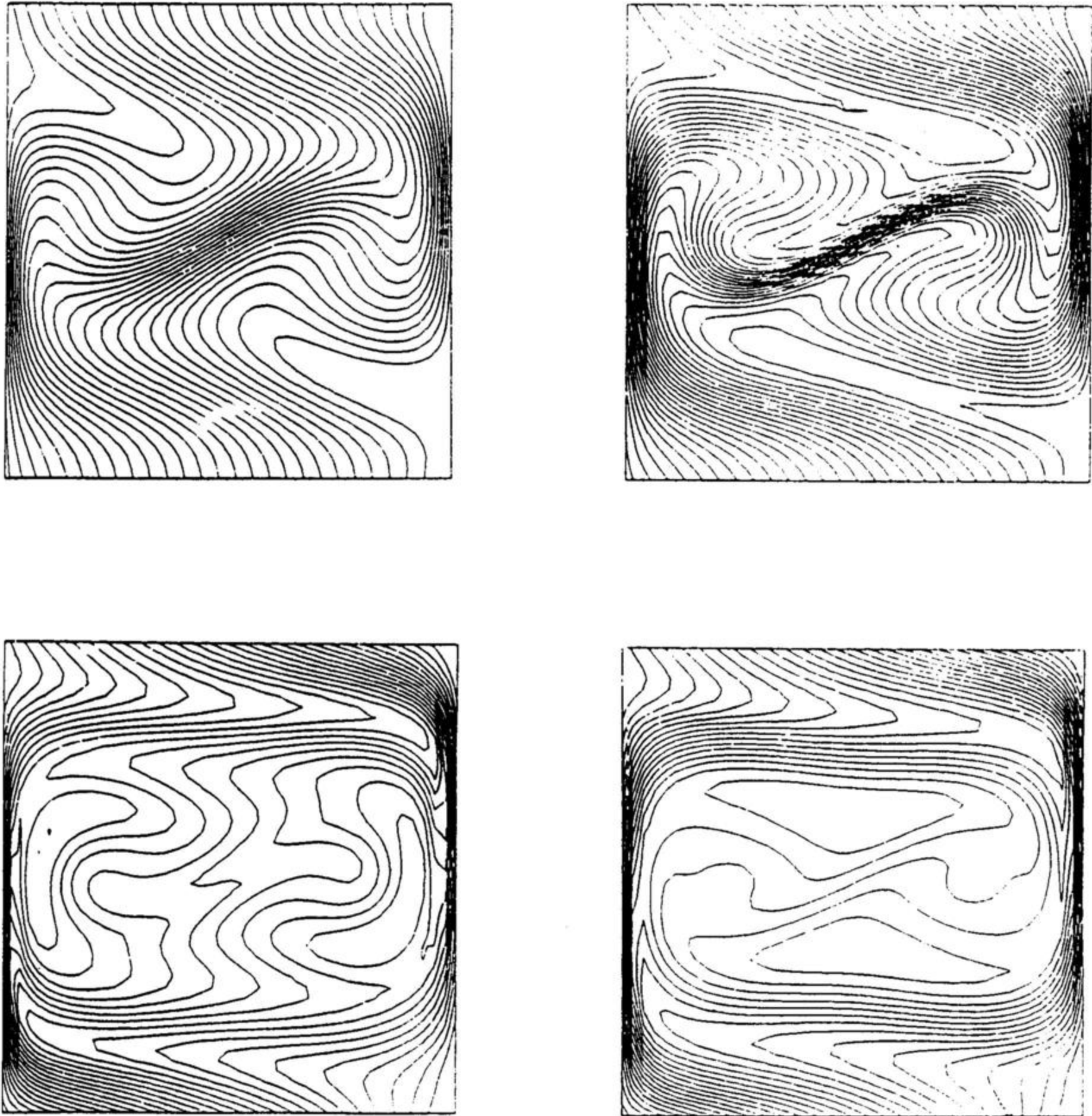


Figura 3.4.7 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 800$ y $m = 0,30$. Para $t = 1, 2, 6,$

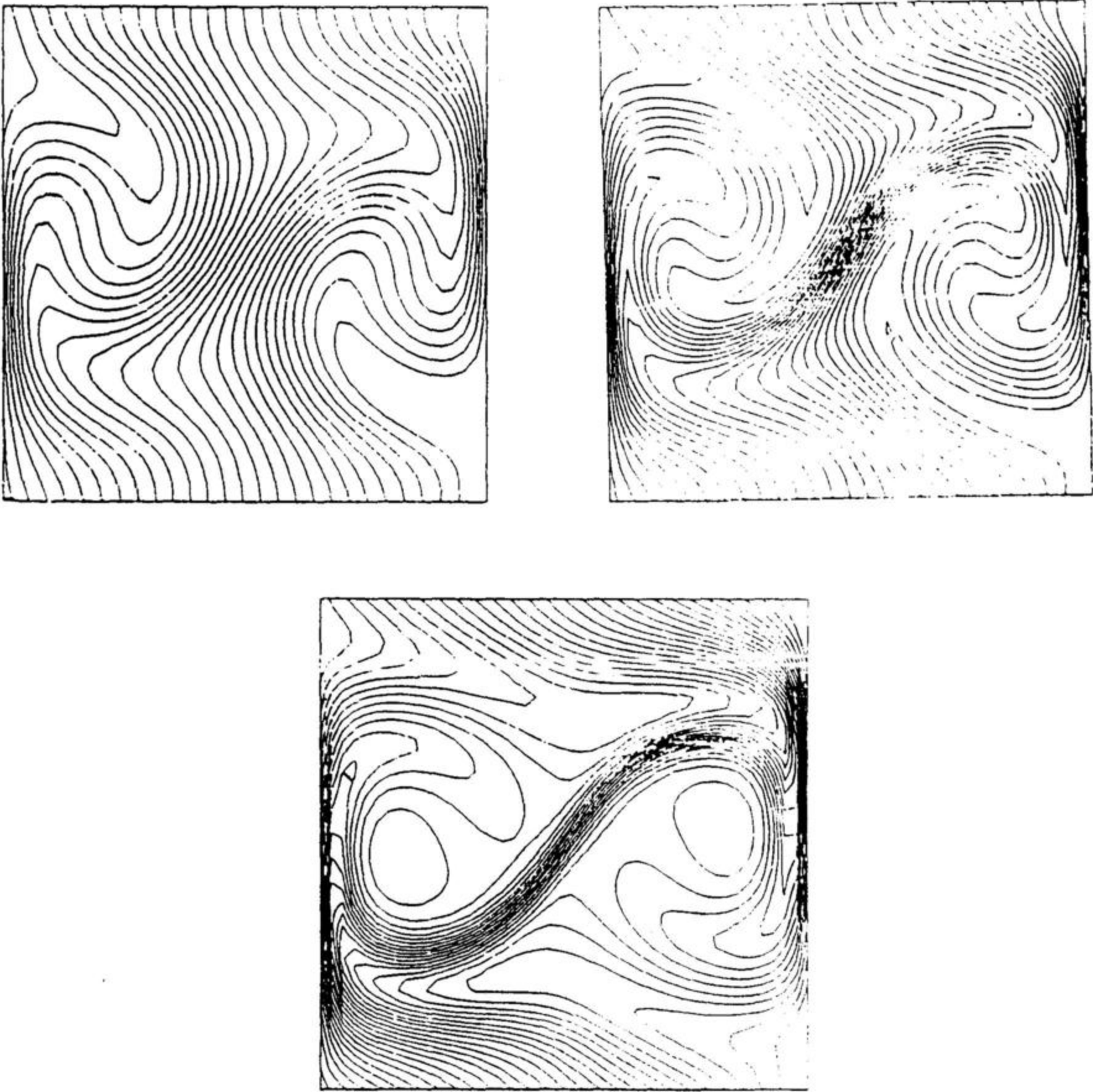


Figura 3.4.8 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 800$ y $m = 0,10$. Para $t = 1, 2, 5$.

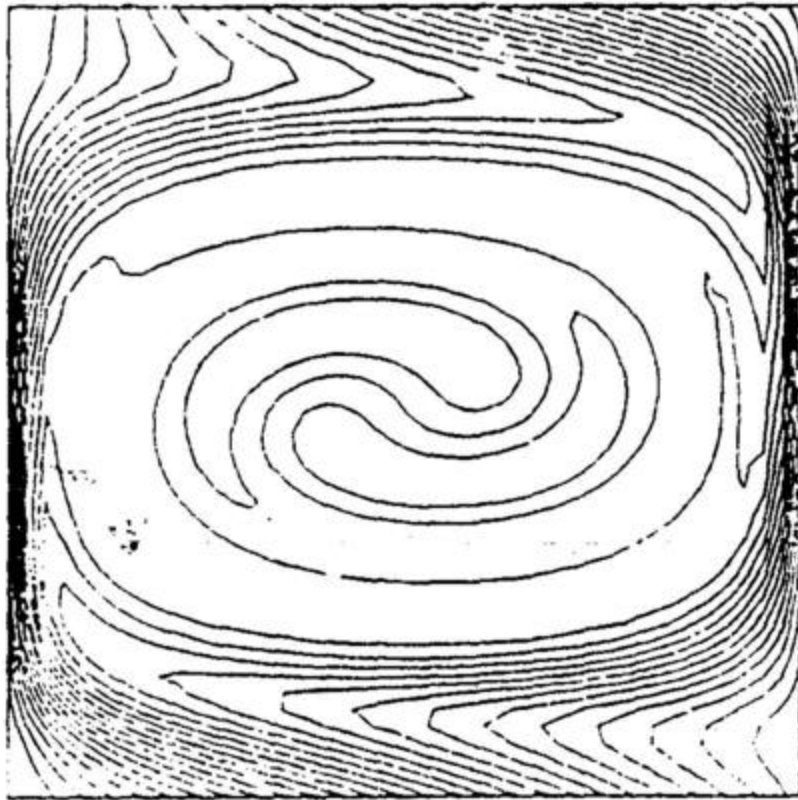


Figura 3.4.9 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 500$ y $m = 1,00$. Para $t = 3$.

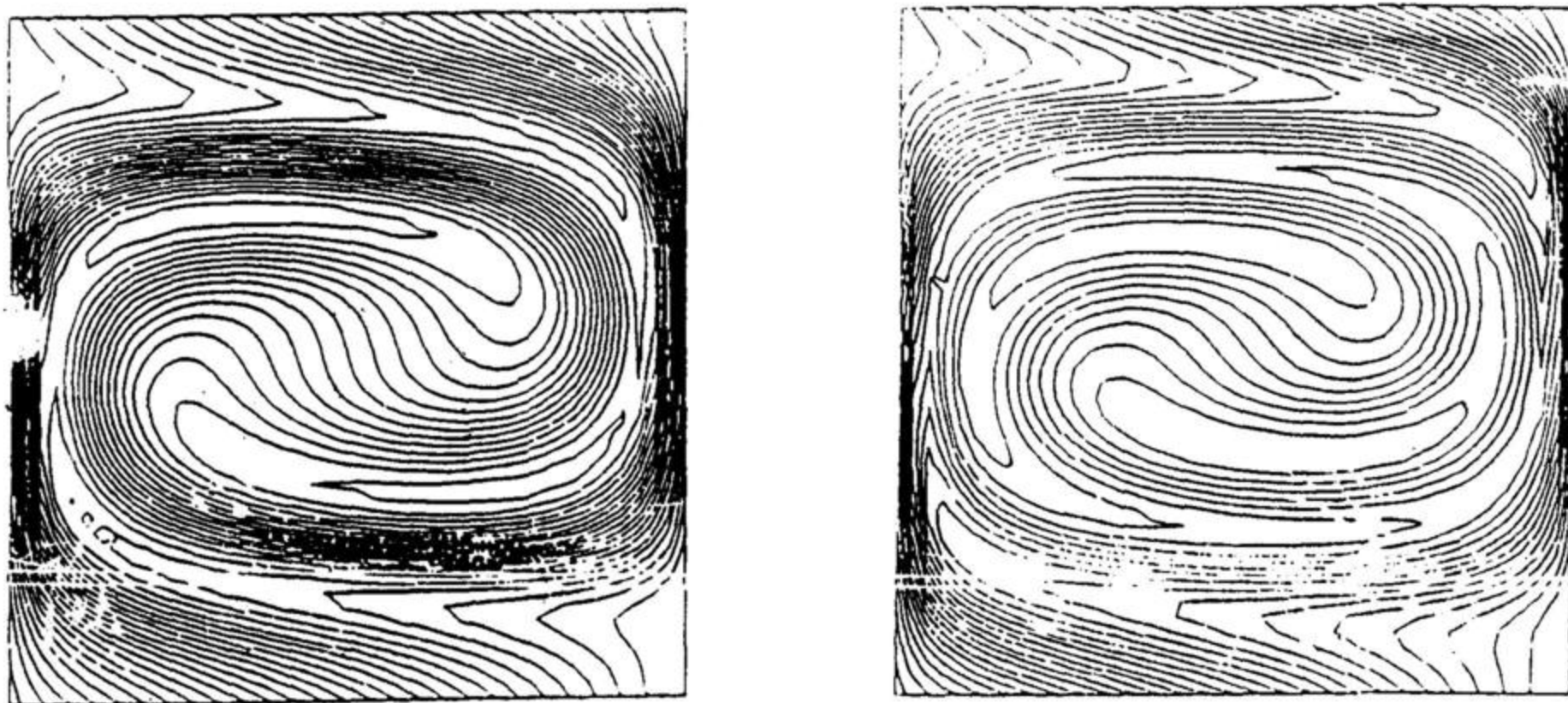


Figura 3.4.10 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 500$ y $m = 0,70$. Para $t = 2, 3$.

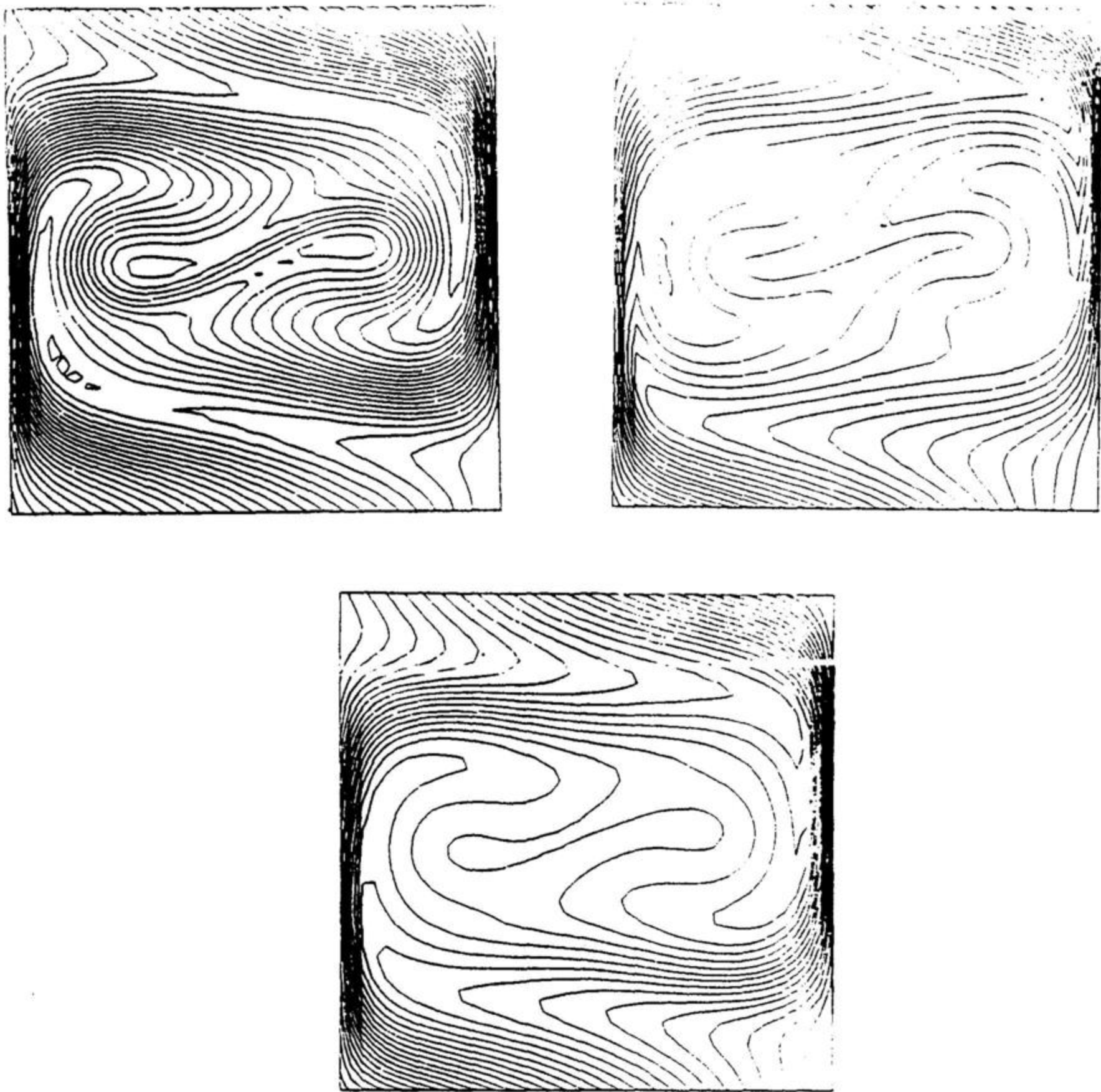


Figura 3.4.11 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 500$ y $m = 0,30$. Para $t = 3, 6,$

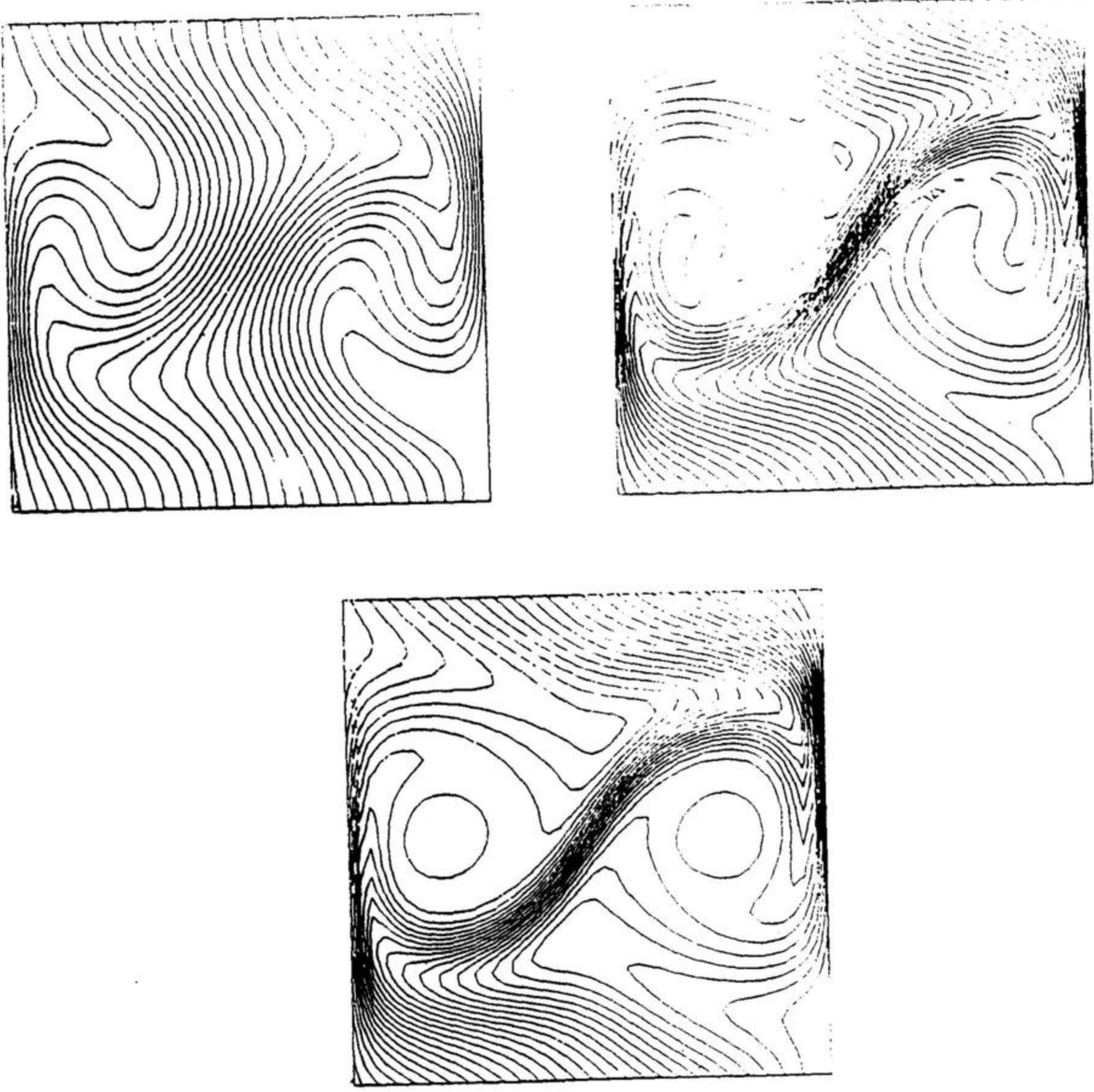


Figura 3.4.12 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 500$ y $m = 0,10$. Para $t = 1, 3$.

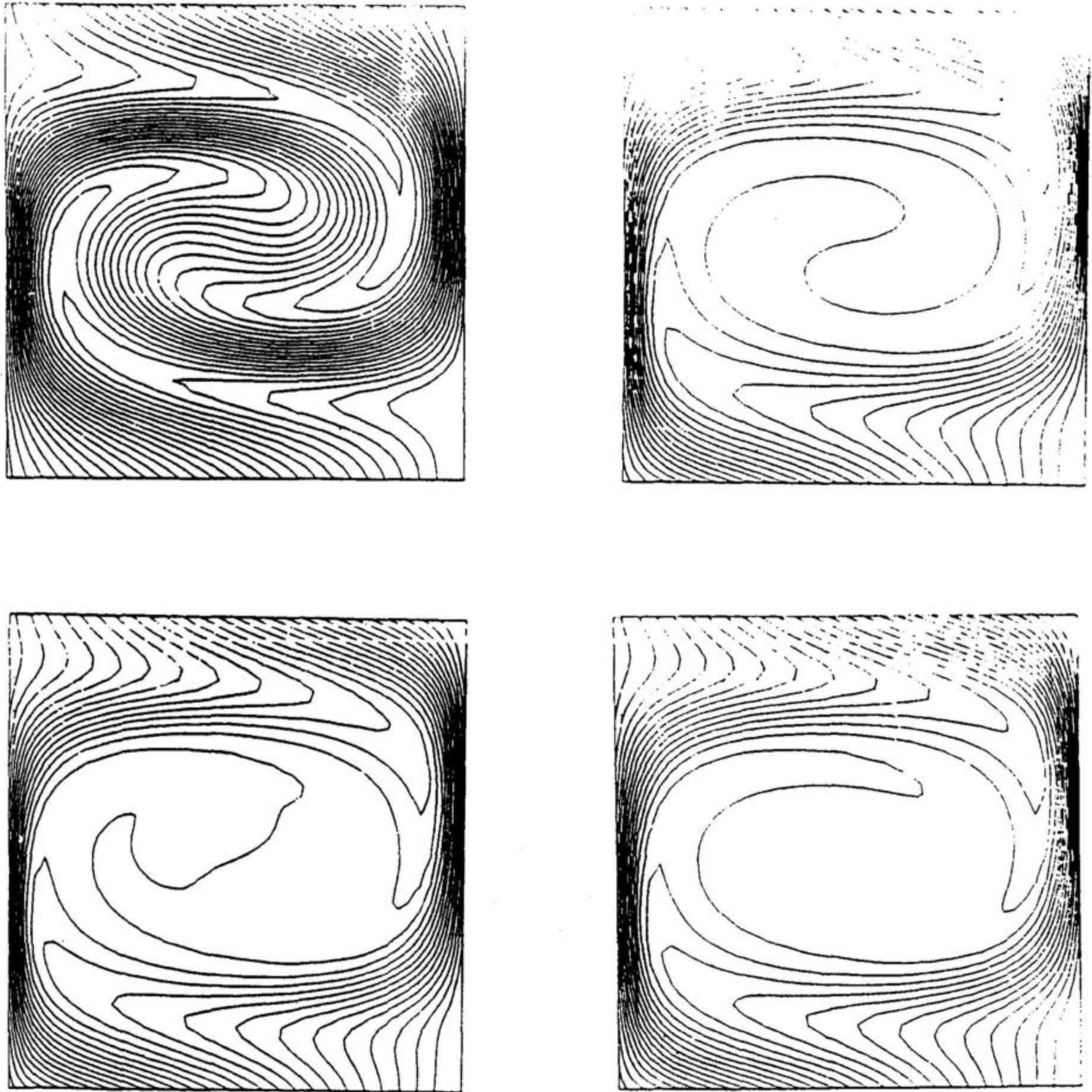


Figura 3.4.13 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 200$ y $m = 1,00$. Para $t = 1, 3, 5, 7$.

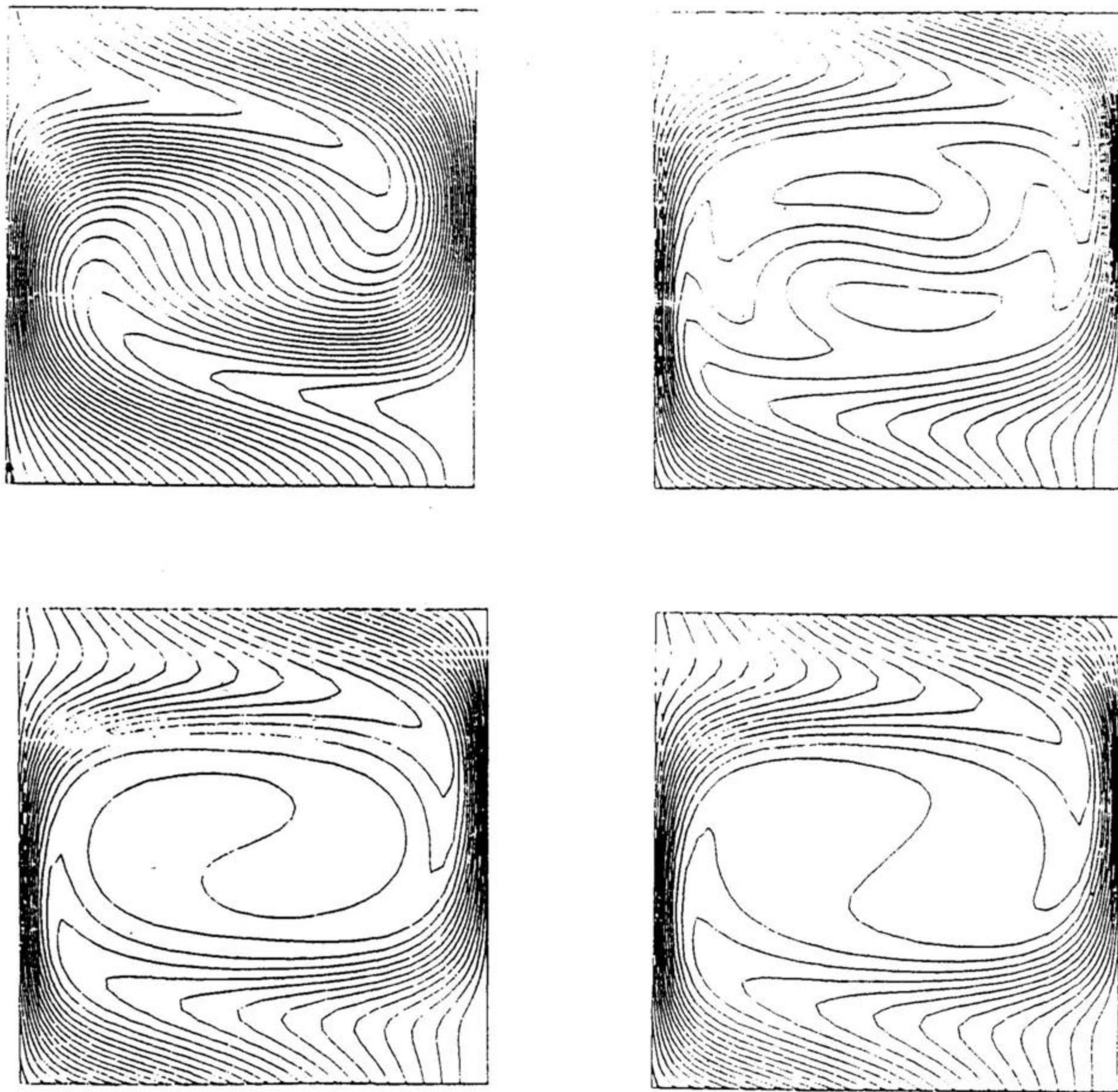


Figura 3.4.14 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 200$ y $m = 0,70$. Para $t = 1, 3, 5, 6$.

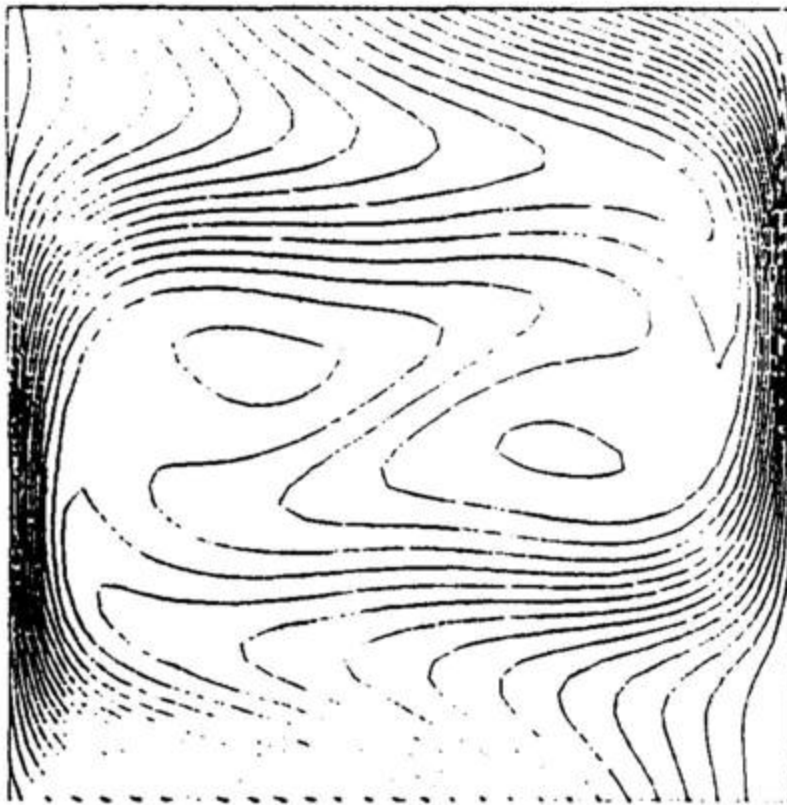


Figura 3.4.15 Imágenes del torbellino fuerte con $R_m = 200$ y $m = 0,30$. Para $t = 5$.

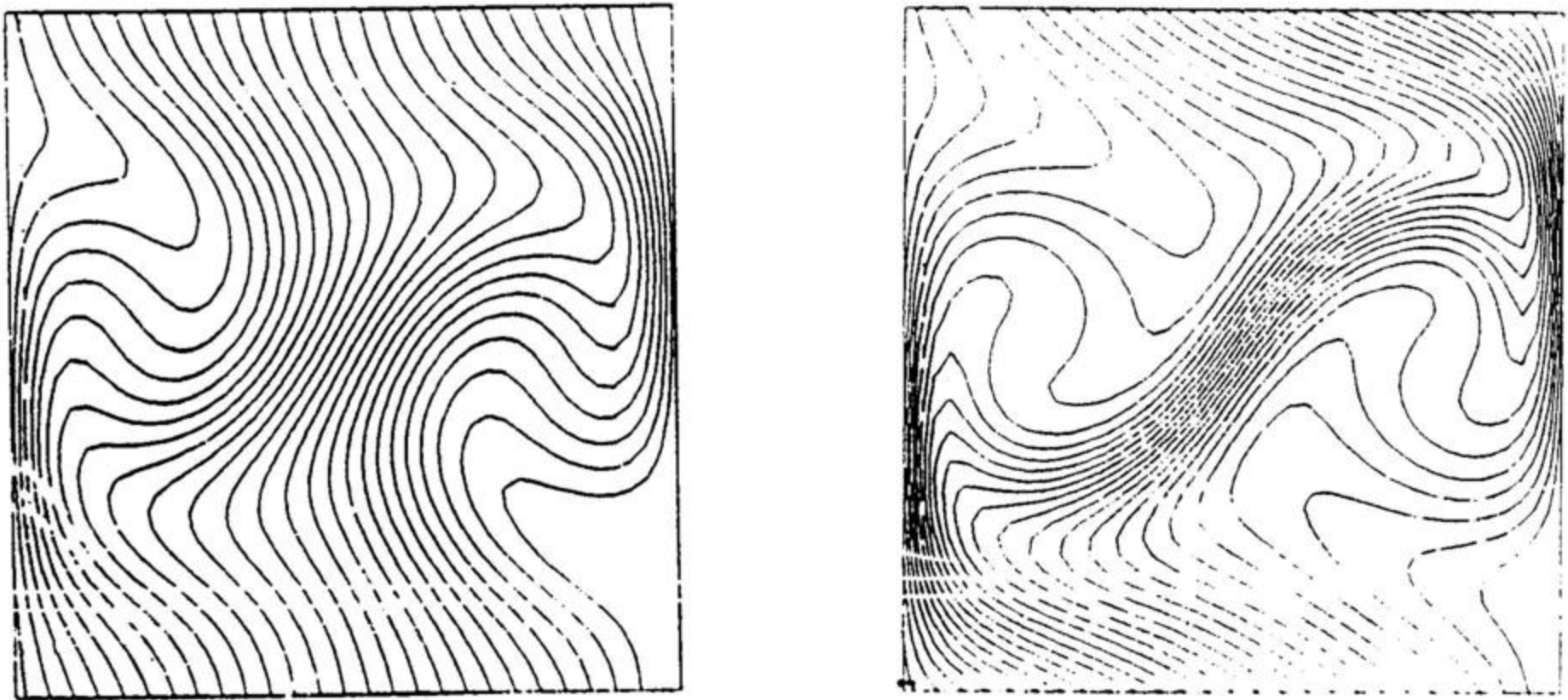


Figura 3.4.16 Secuencia de imágenes para el torbellino fuerte con $R_m = 200$ y $m = 0,10$. Para $t = 1, 5$.

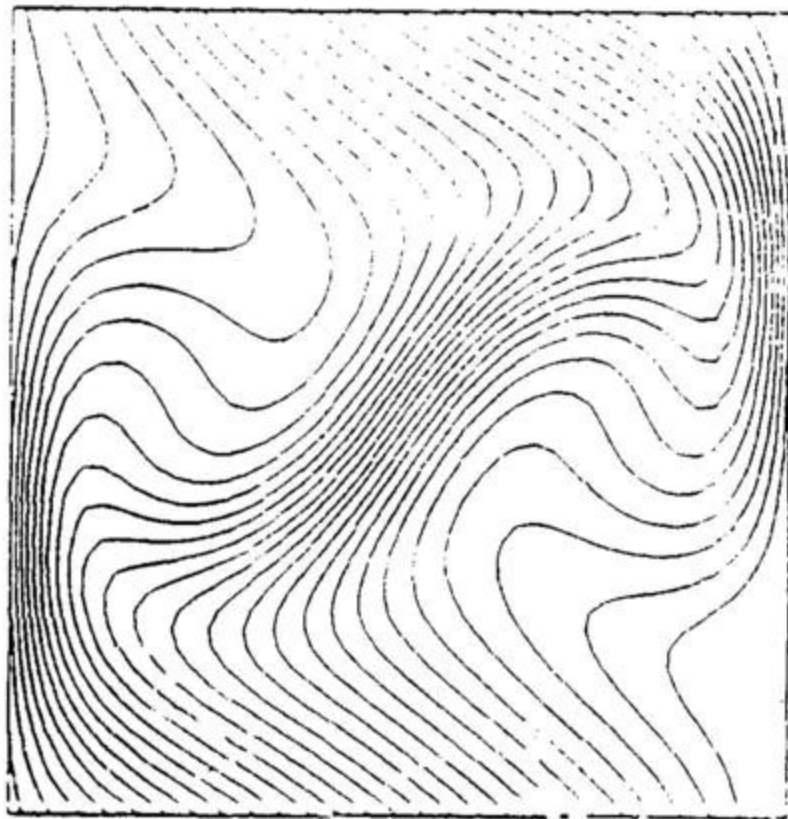


Figura 3.4.17 Estado estacionario para el torbellino fuerte con $R_m = 500$ y $m = 0,70$.

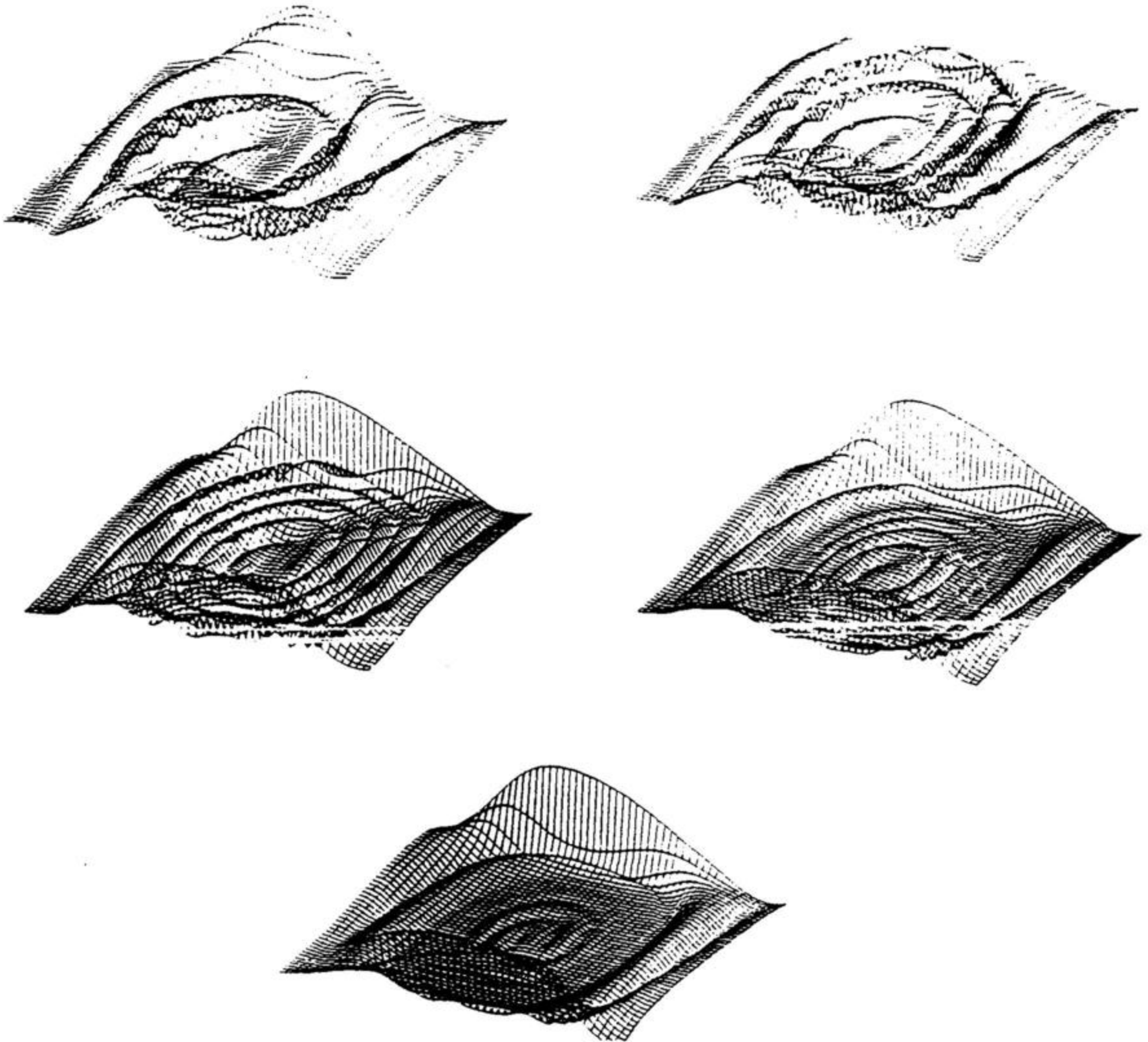


Figura 3.4.18 Variación de la densidad de energía magnética para el torbellino fuerte con $R_m = 1000$ y $m = 1,00$. Para $t = 1, 2, 3, 4, 5$.

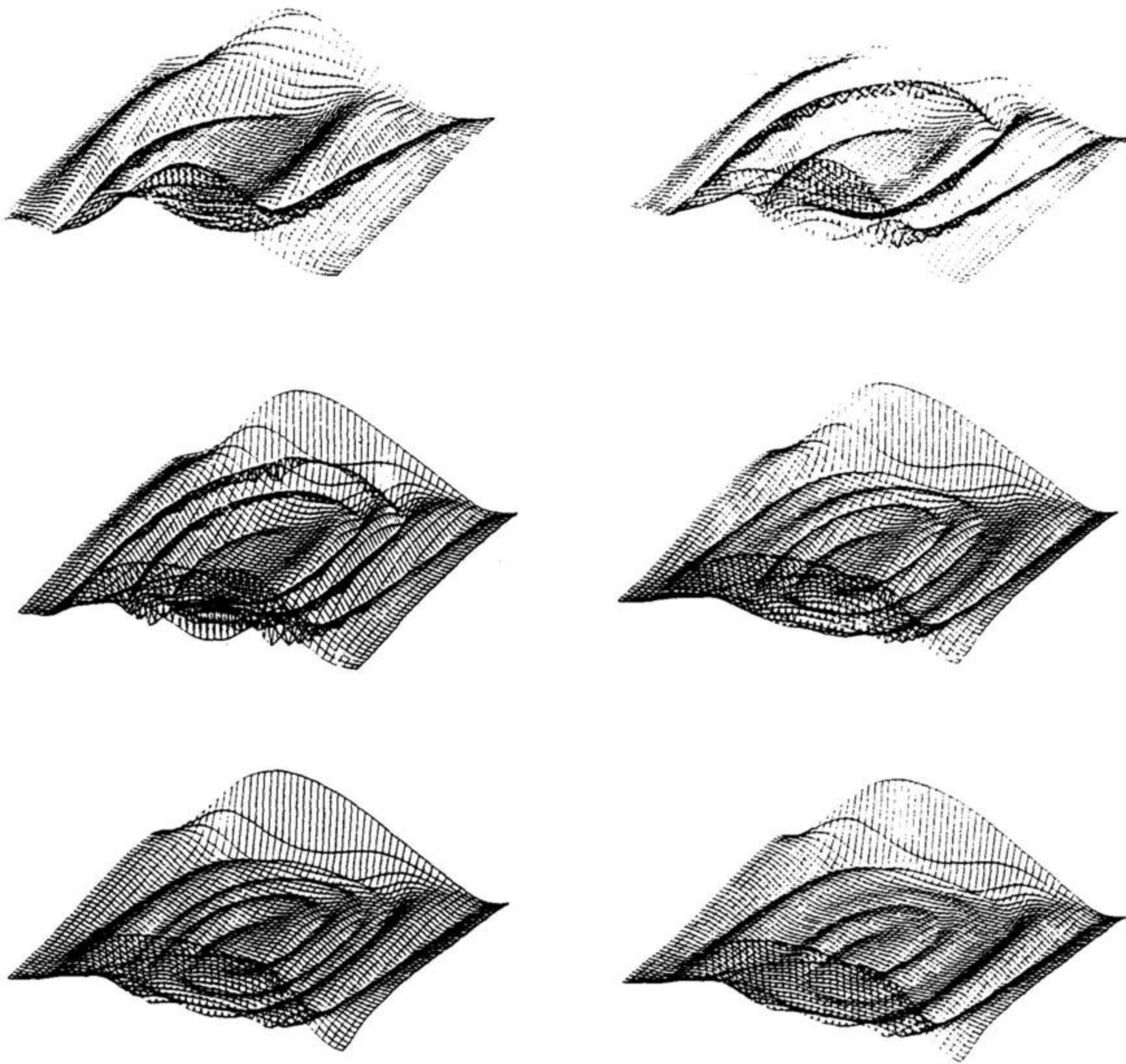


Figura 3.4.19 Variación de la densidad de energía magnética para el torbellino fuerte con $R_m = 1000$ y $m = 0,70$. Para $t = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

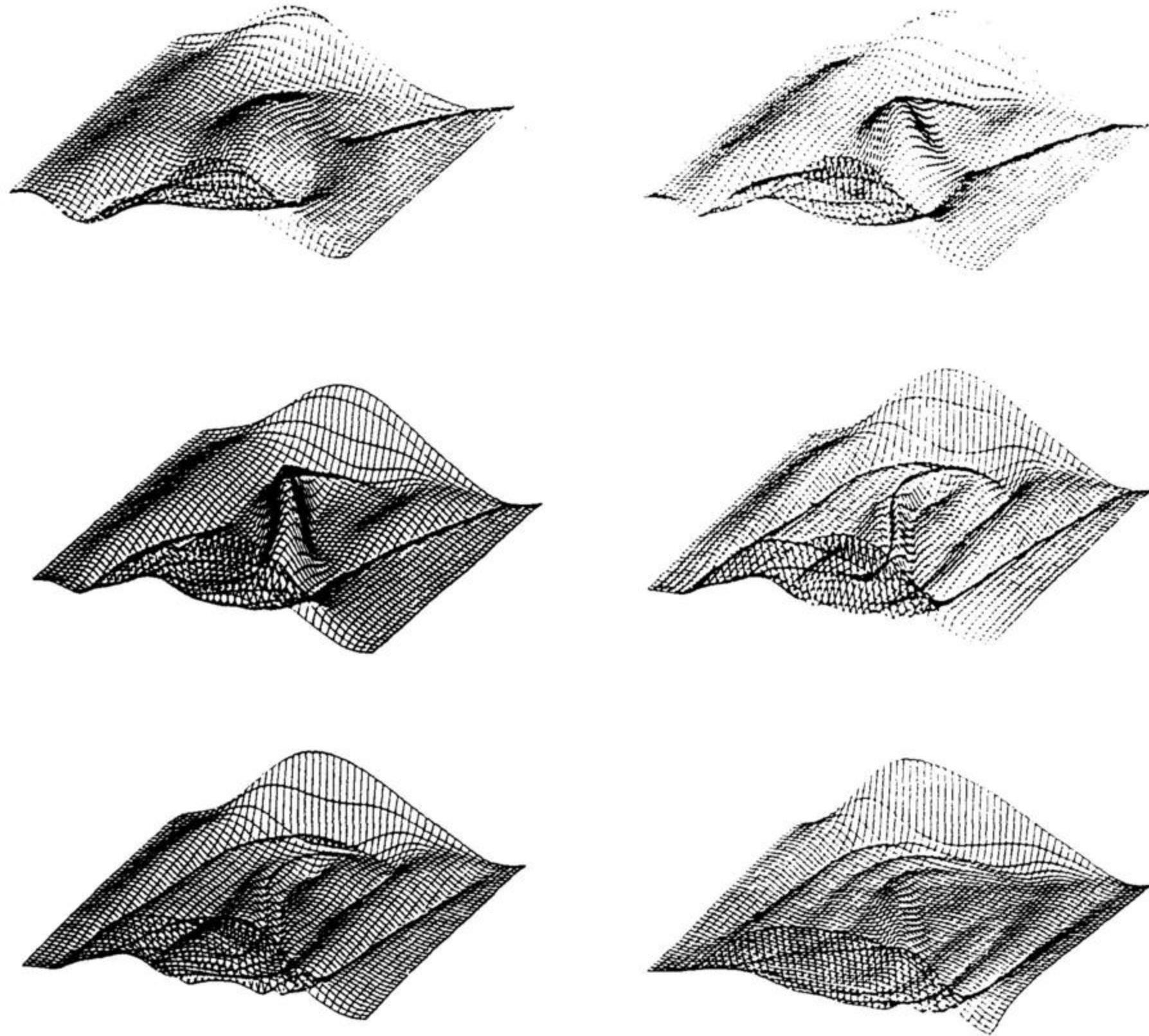


Figura 3.4.20 Variación de la densidad de energía magnética para el torbellino fuerte con $R_m = 1000$ y $m = 0,30$. Para $t = 0,5, 1, 1,5, 3, 3,5, 8$.

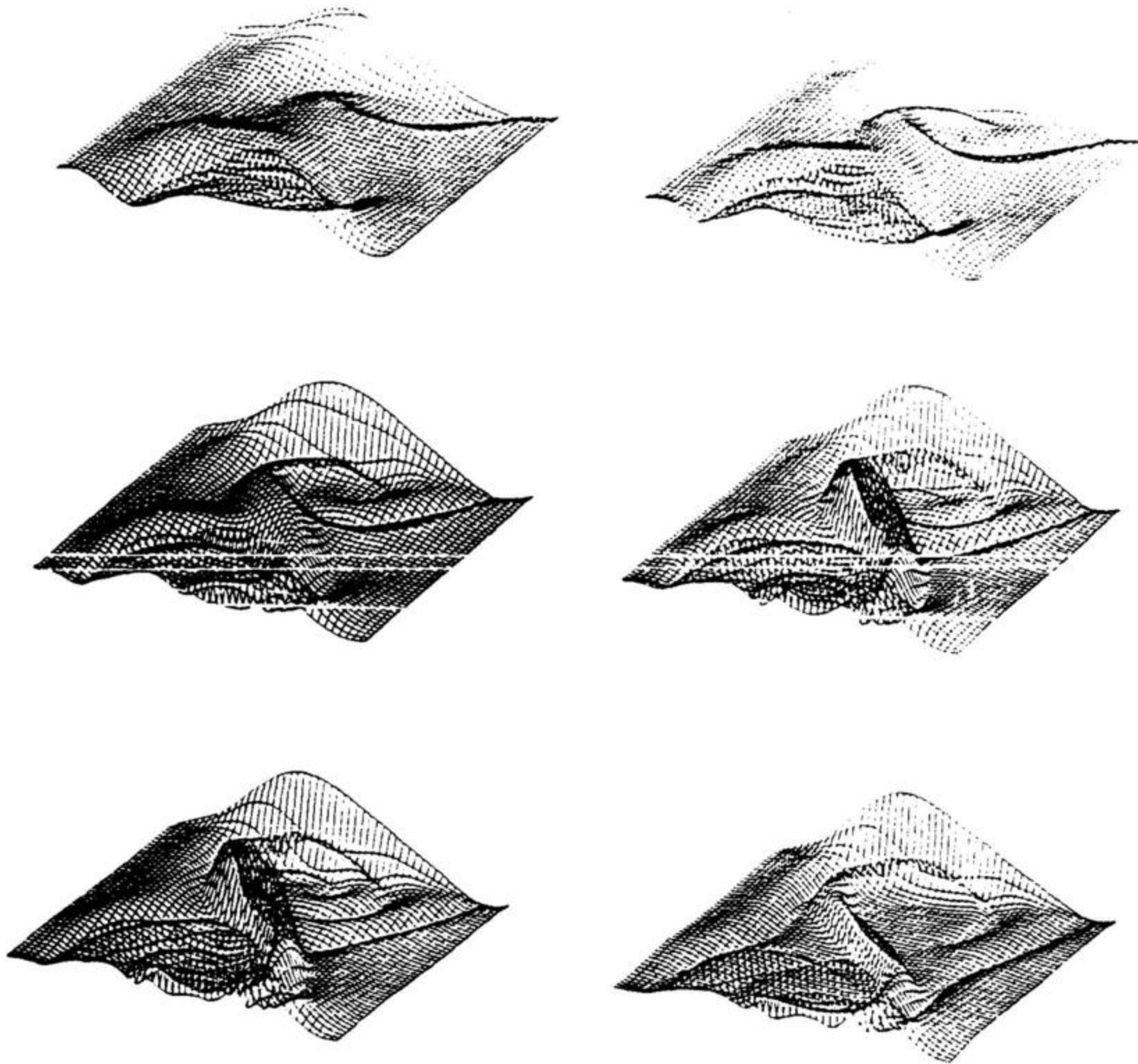


Figura 3.4.21 Variación de la densidad de energía magnética para el torbellino fuerte con $R_m = 1000$ y $m = 0,10$. Para $t = 0.5, 1, 1.5, 2.5, 3, 5$.

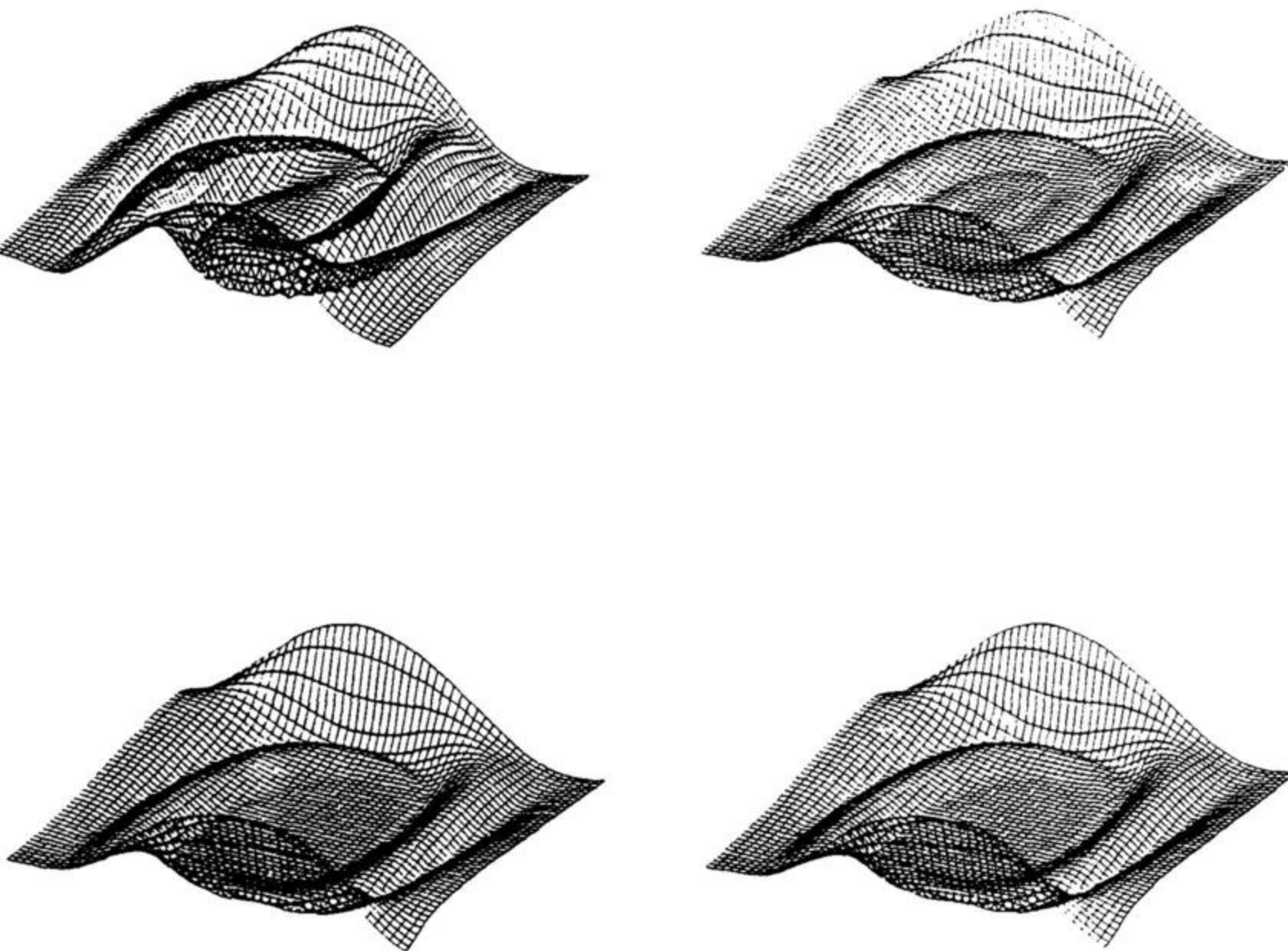


Figura 3.4.22 Variación de la densidad de energía magnética para el torbellino fuerte con $R_m = 200$ y $m = 1,00$. Para $t = 1, 3, 5, 7$.

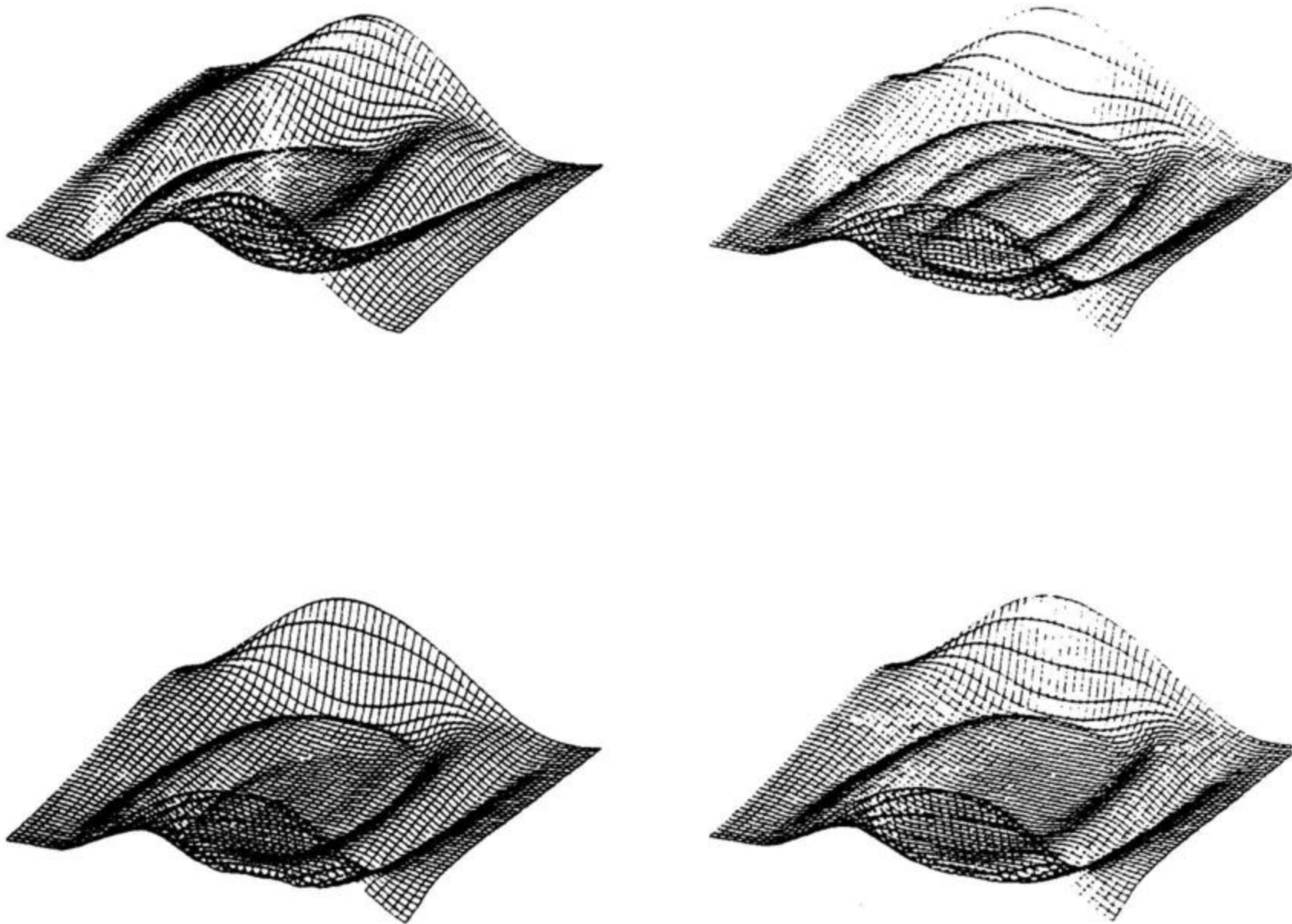


Figura 3.4.23 Variación de la densidad de energía magnética para el torbellino fuerte con $R_m = 200$ y $m = 0,70$. Para $t = 1, 3, 5, 6$.

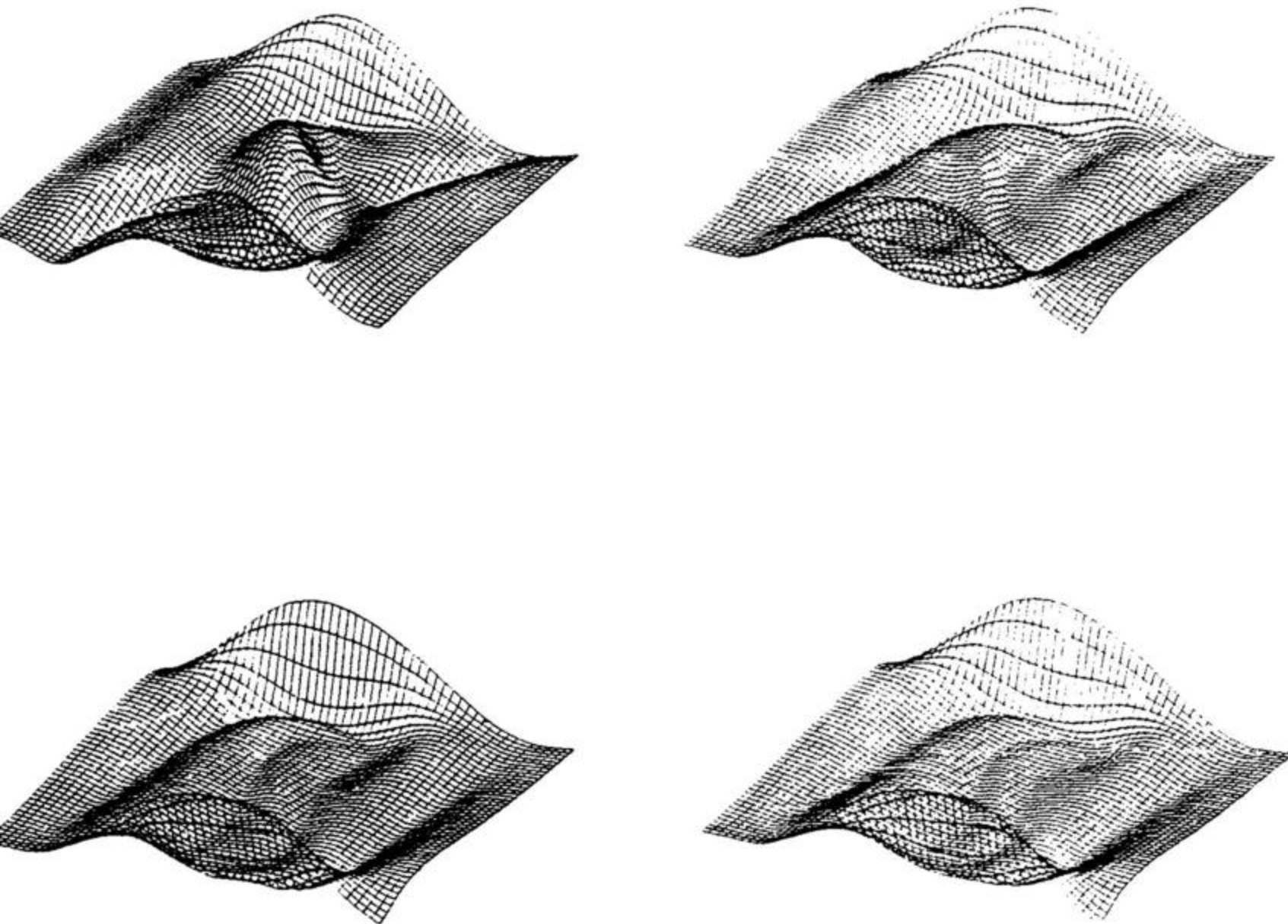


Figura 3.4.24 Variación de la densidad de energía magnética para el torbellino fuerte con $R_m = 200$ y $m = 0,30$. Para $t = 1, 3, 5, 6$.

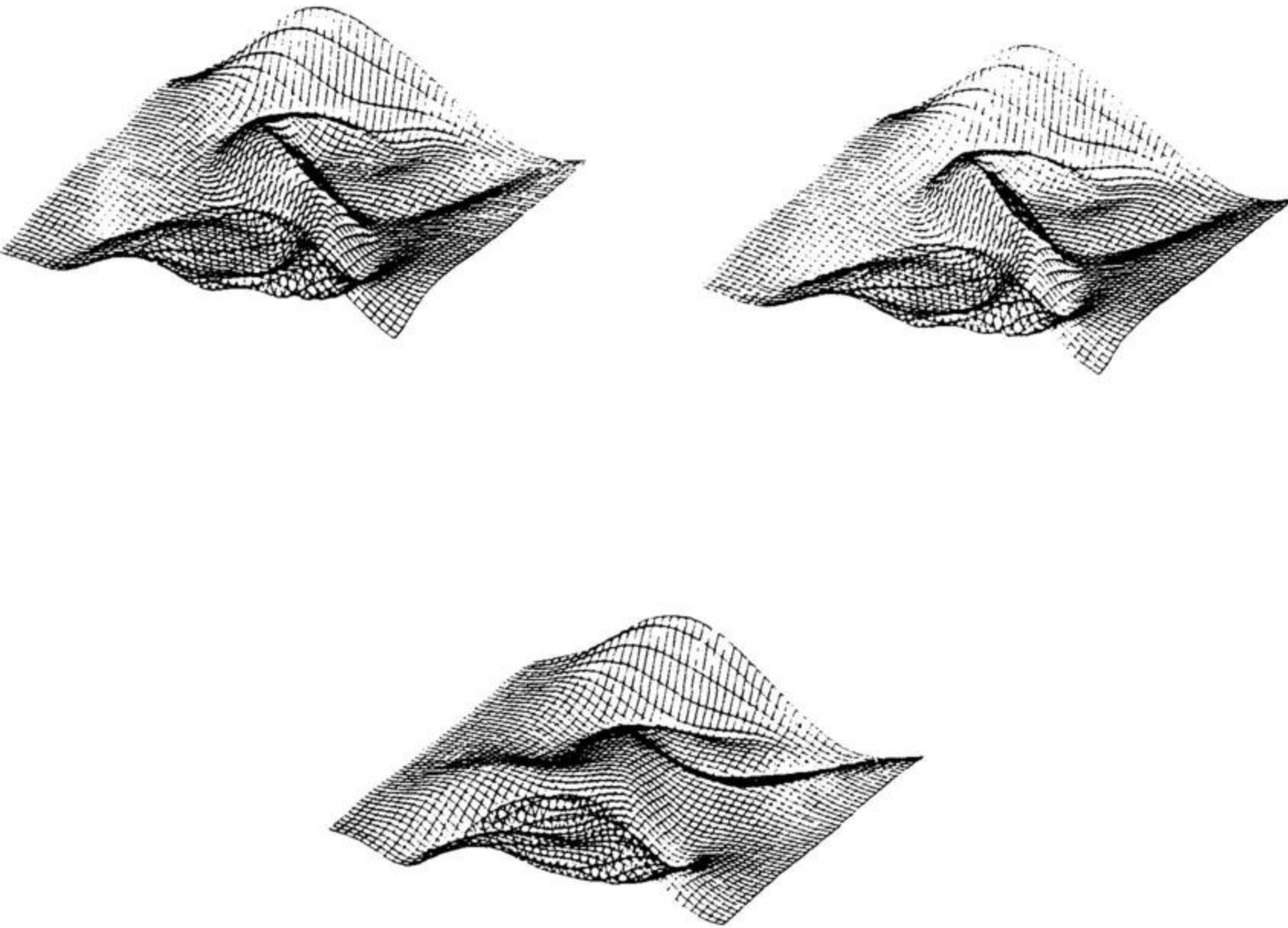


Figura 3.4.25 Variación de la densidad de energía magnética para el torbellino fuerte con $R_m = 200$ y $m = 0,10$. Para $t = 1, 4, 5$.

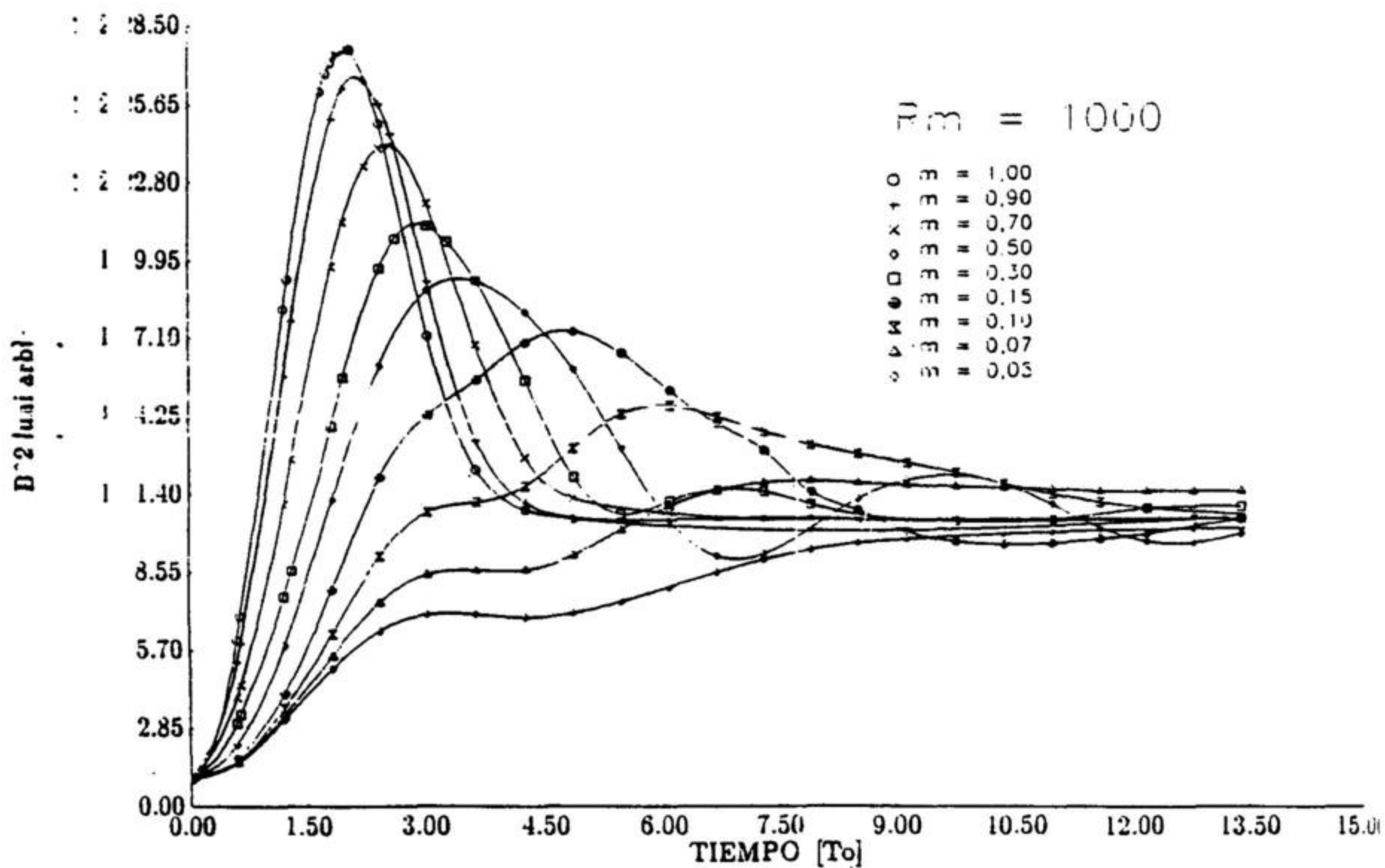


Figura 3.4.26 Variación de la densidad de energía magnética media en el tiempo para diferentes tipos de torbellinos fuertes con $R_m = 1000$

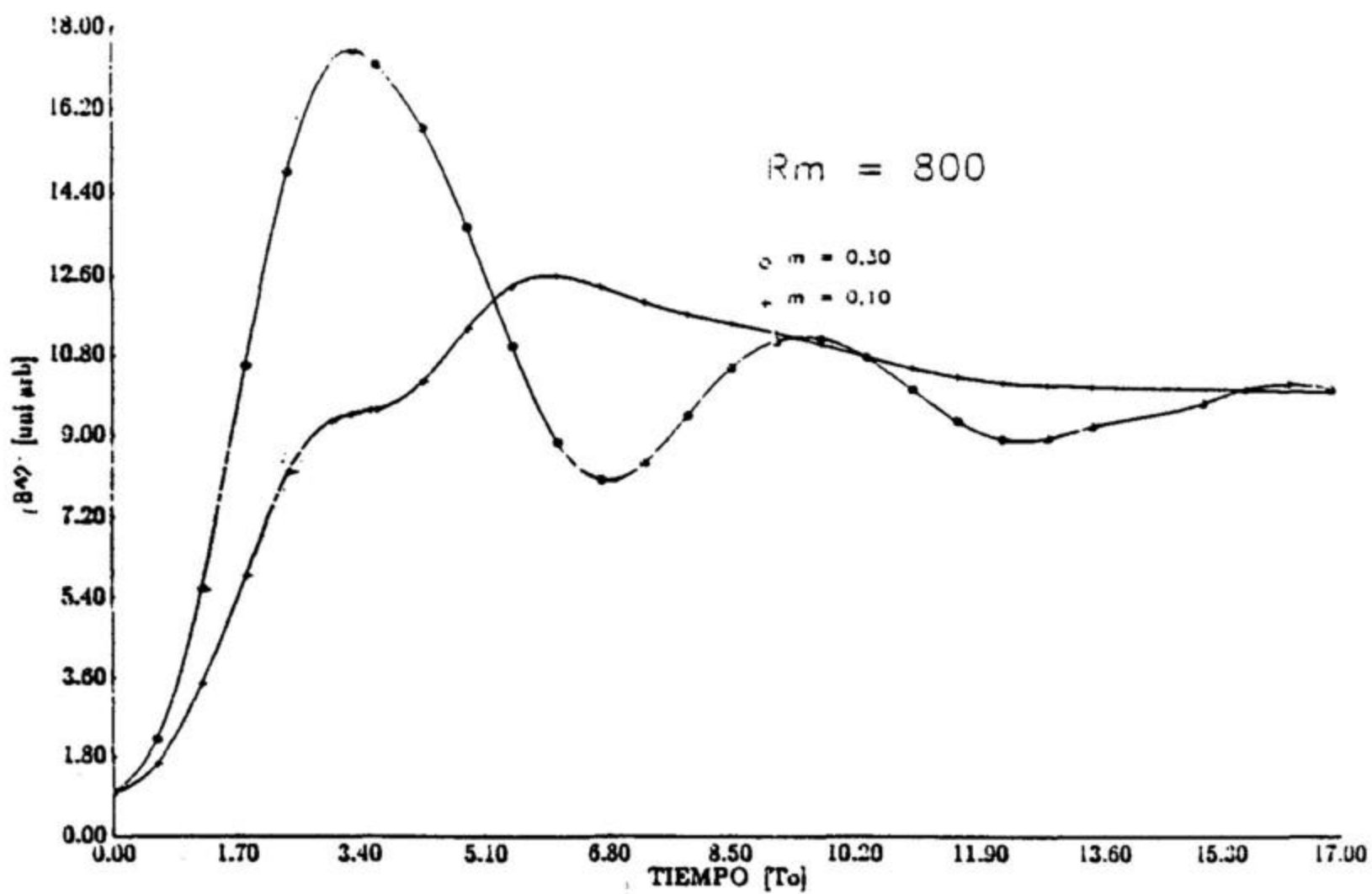


Figura 3.4.27 Variación de la densidad de energía magnética media en el tiempo para diferentes tipos de torbellinos fuertes con $R_m = 800$

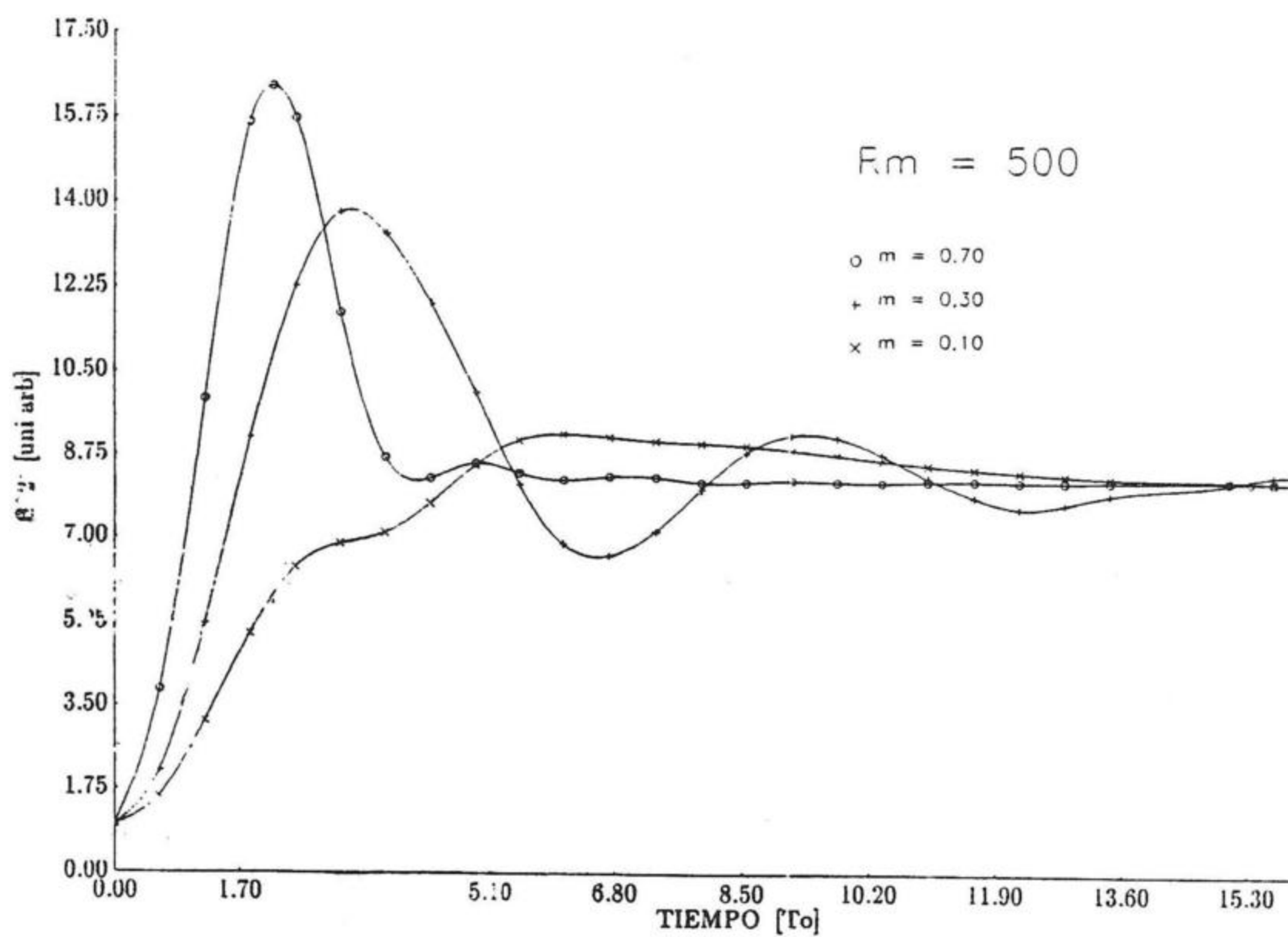


Figura 3.4.28 Variación de la densidad de energía magnética media en el tiempo para diferentes tipos de torbellinos fuertes con $R_m = 500$

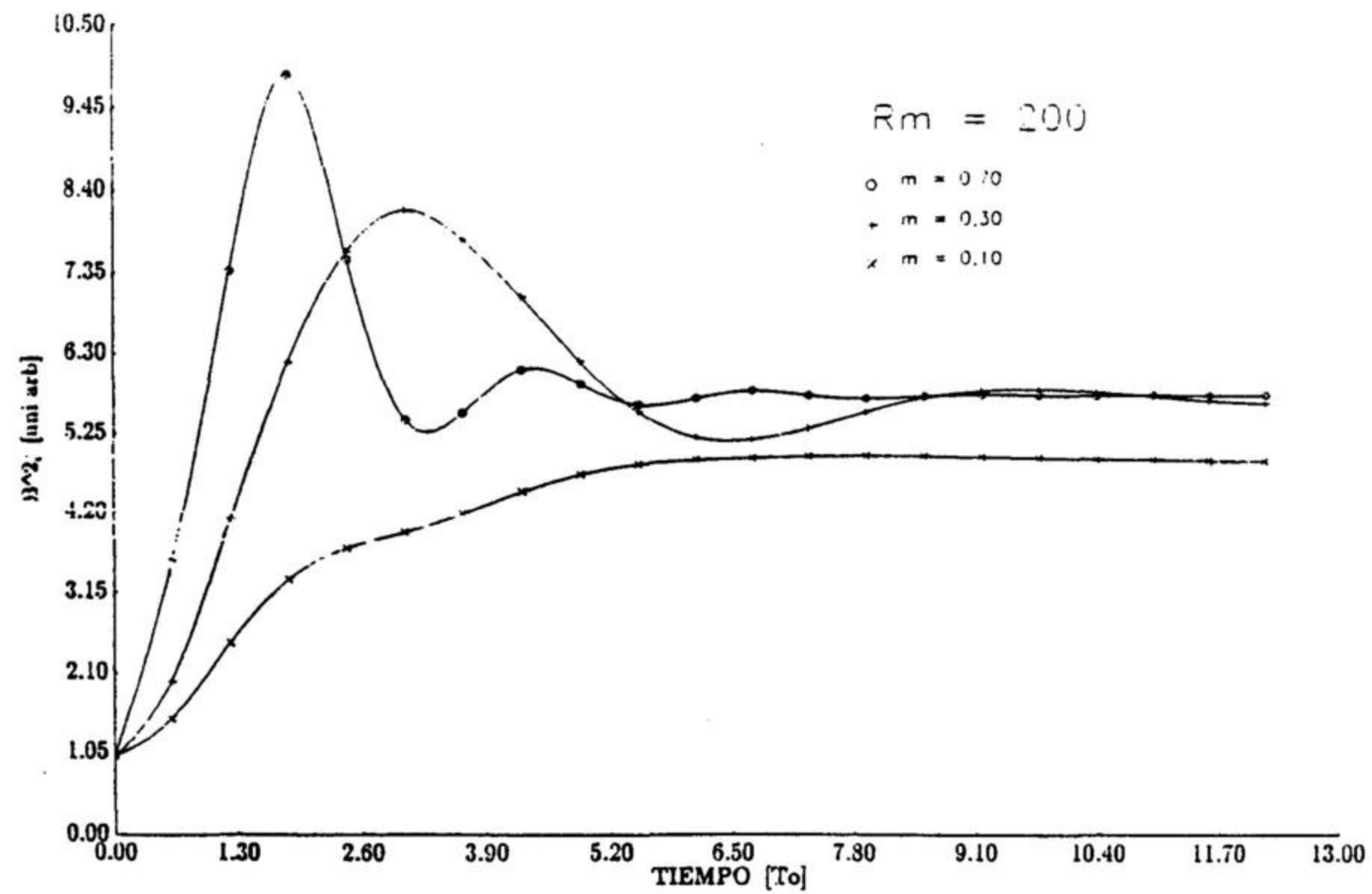


Figura 3.4.29 Variación de la densidad de energía magnética media en el tiempo para diferentes tipos de torbellinos fuertes con $R_m = 200$

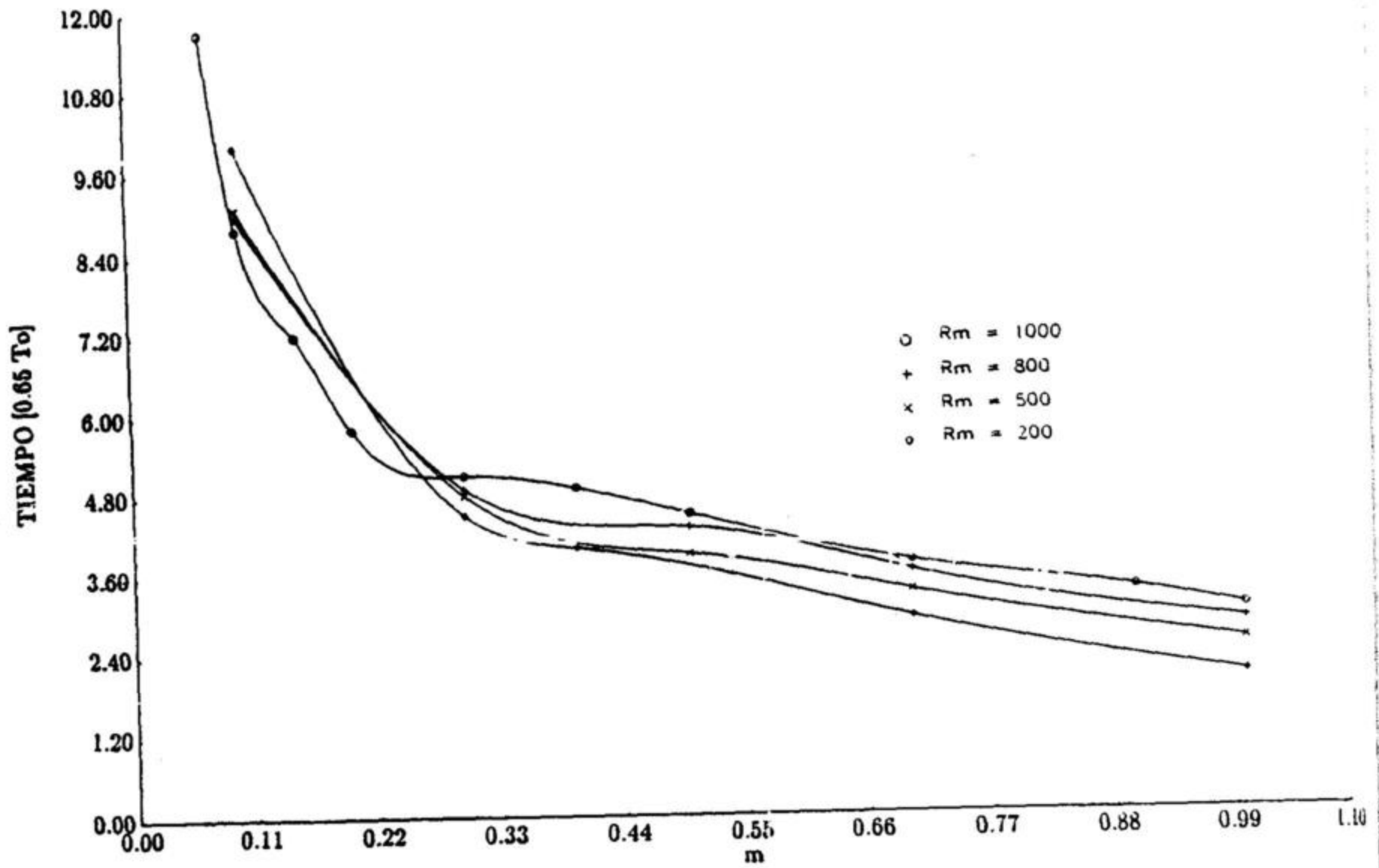


Figura 3.4.30 Tiempo en alcanzar la densidad de energía magnética media en función del tipo de torbellino fuerte

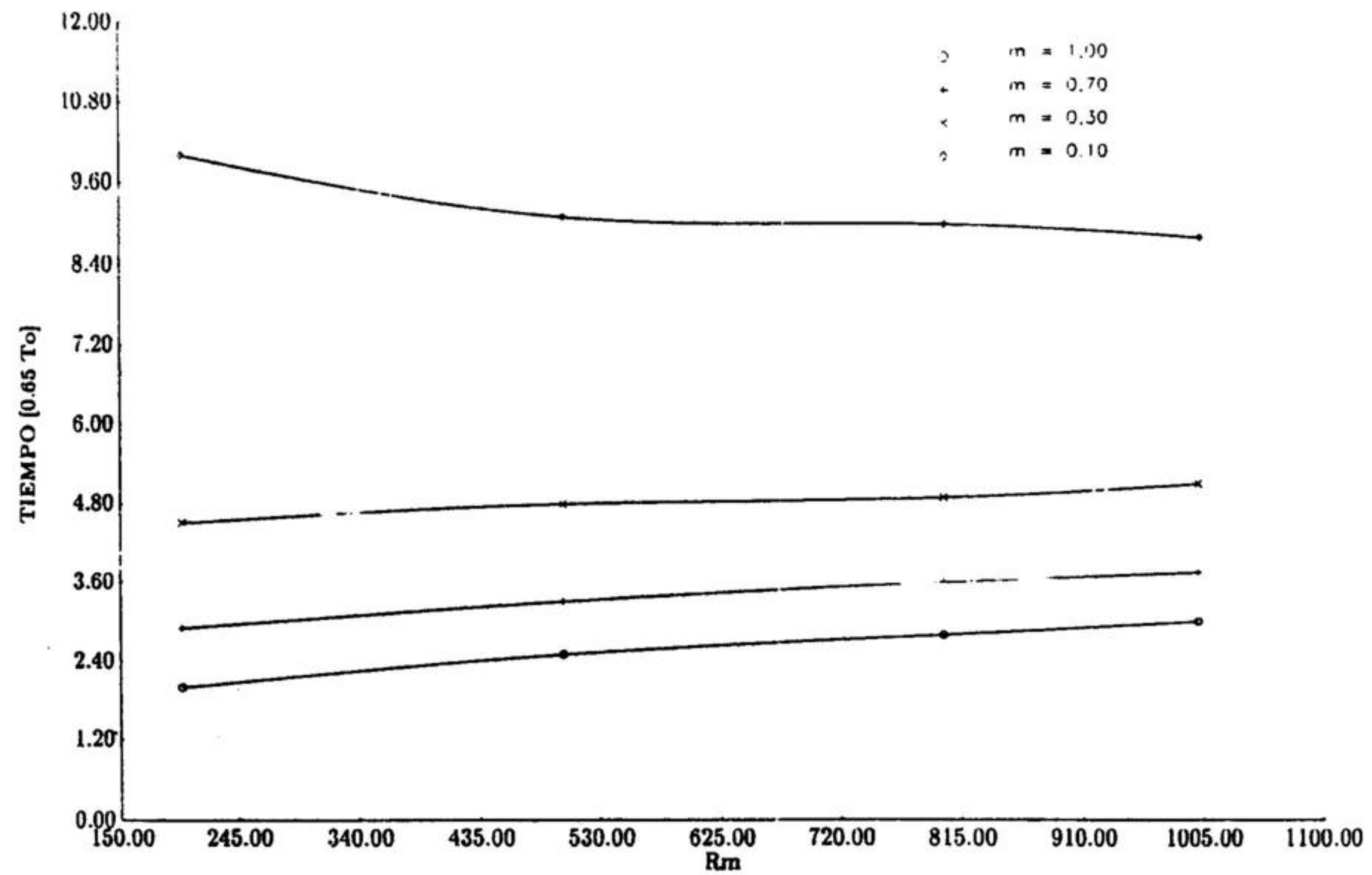


Figura 3.4.31 Tiempo en alcanzar la densidad de energía magnética media en función del número de Reynolds magnético

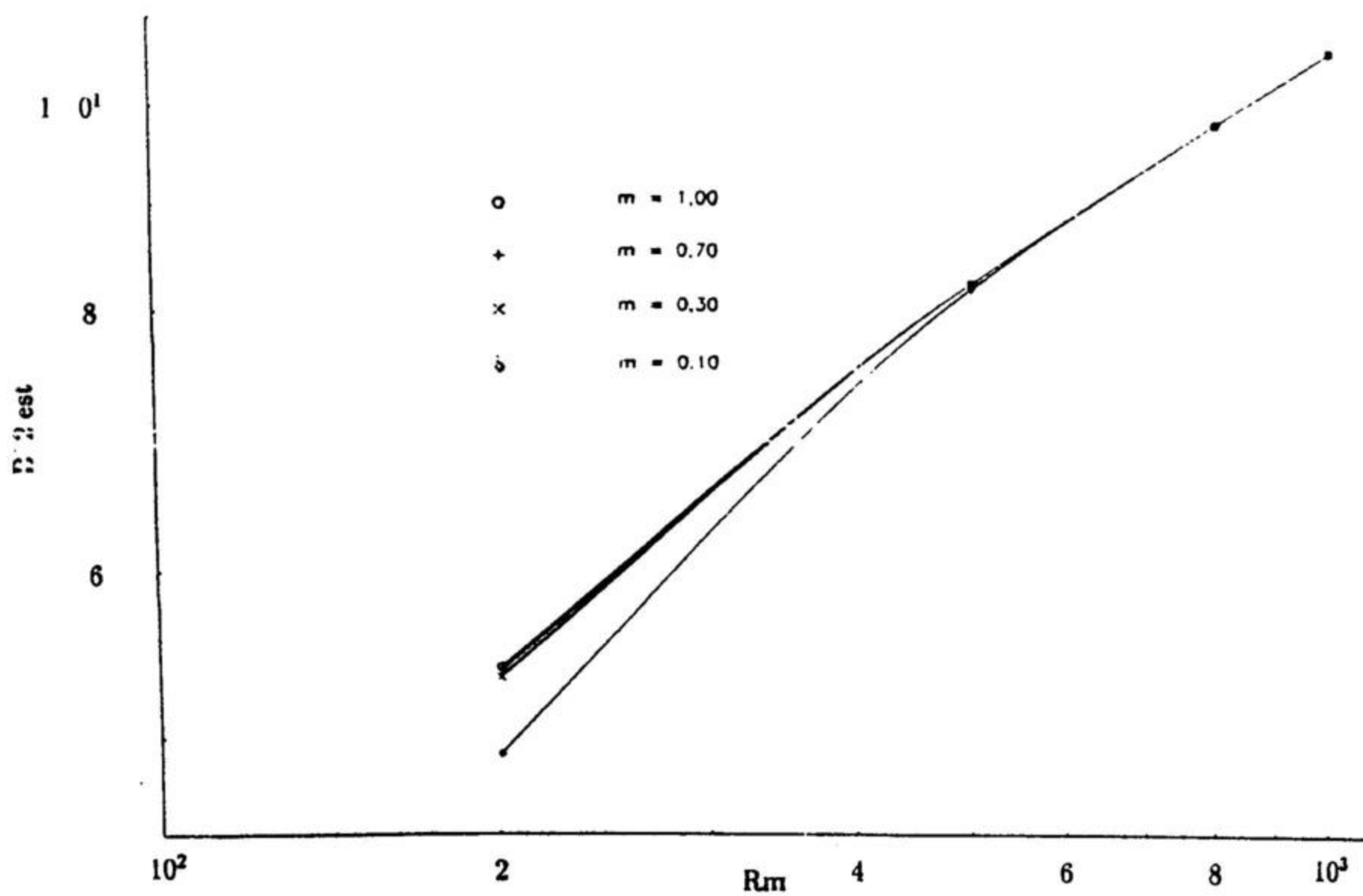


Figura 3.4.32 Densidad de energía magnética media estacionaria en función del número de Reynolds magnético (logarítmica)

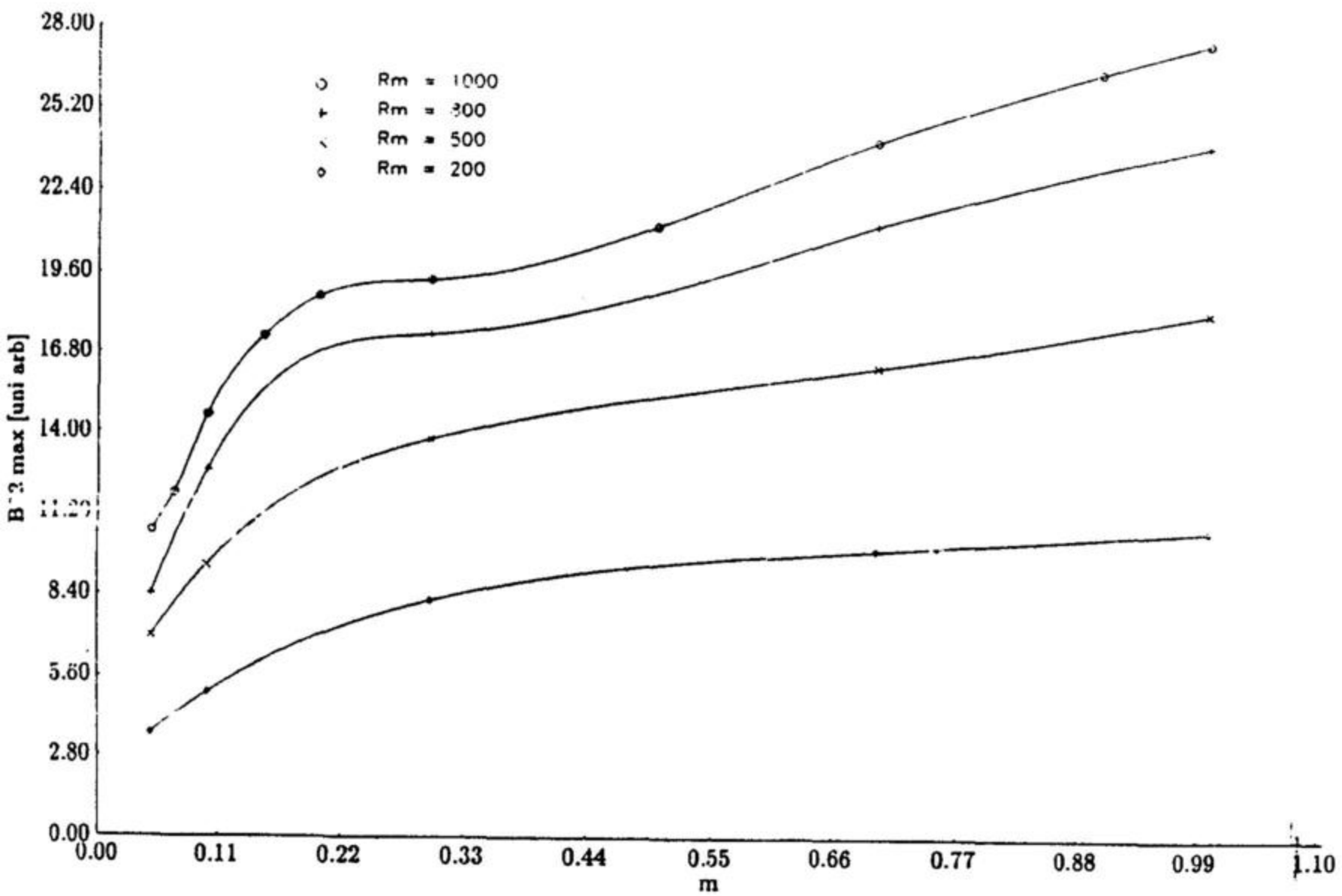


Figura 3.4.33 Densidad de energía magnética media máxima en función del número de Reynolds magnético

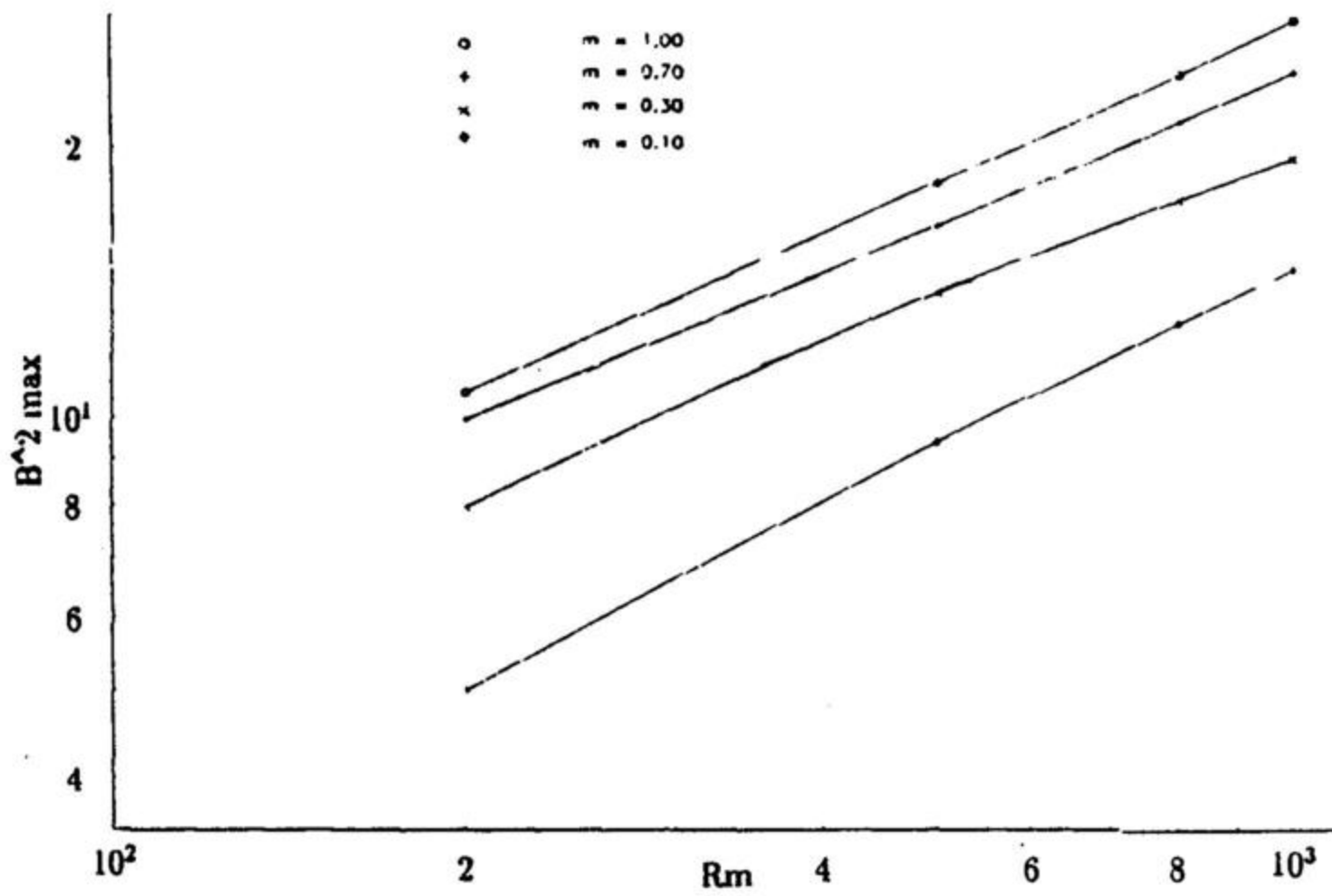


Figura 3.4.34 Densidad de energía magnética media máxima en función del número de Reynolds magnético (logarítmica)

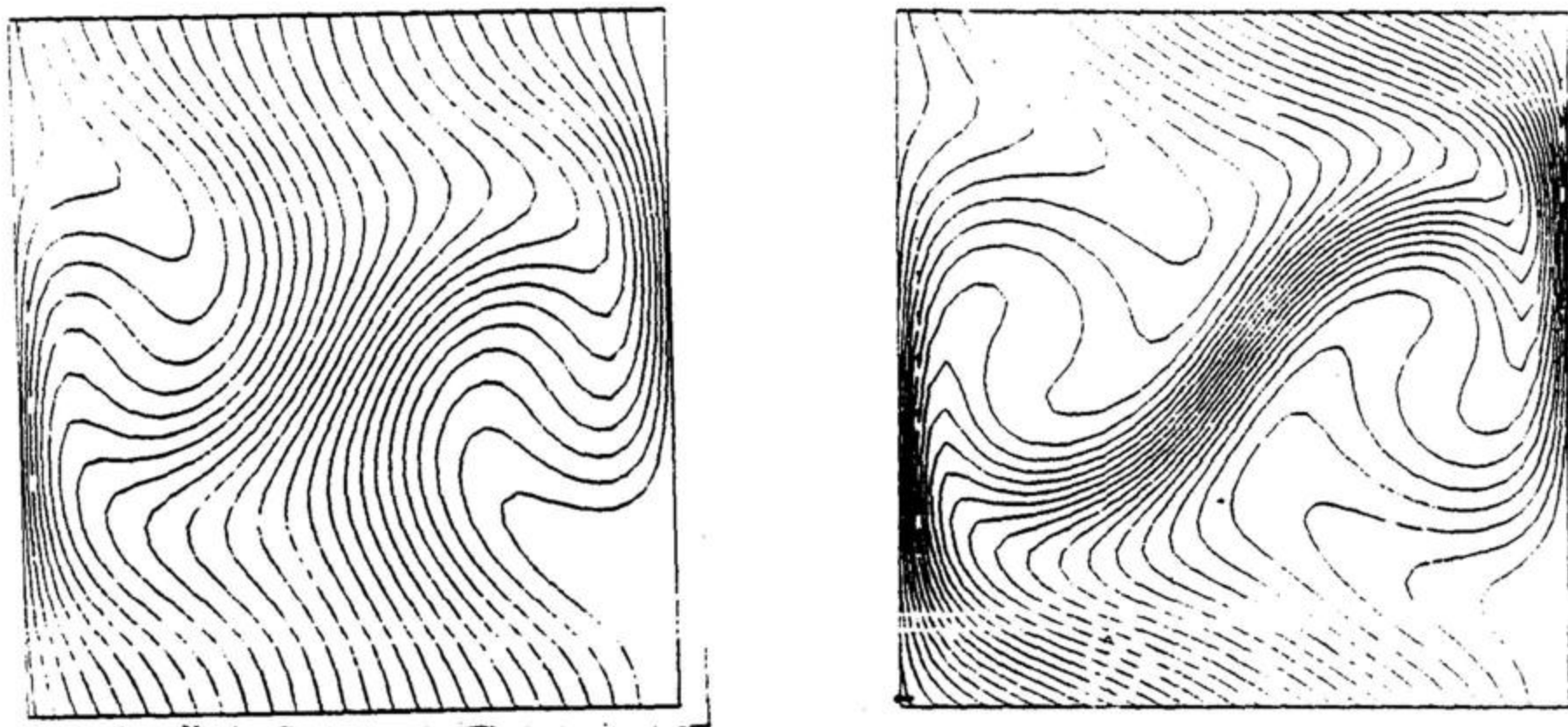


Figura 3.4.35 Secuencia de imágenes para el torbellino débil con $R_m = 1000$ y $m = 0,80$. Para $t = 1, 5$.

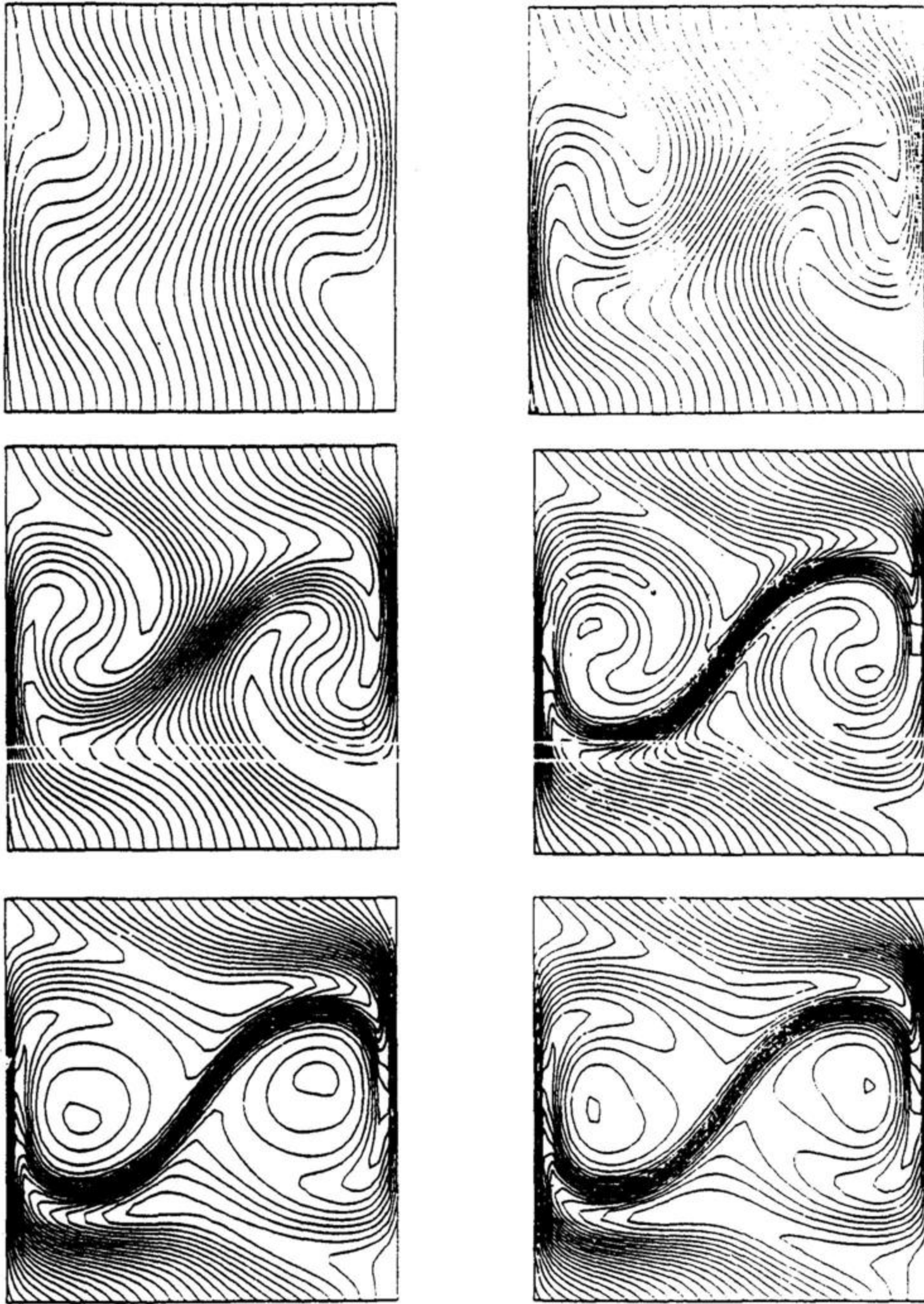


Figura 3.4.36 Secuencia de imágenes para el torbellino débil con $R_m = 1000$ y $m = 0,30$. Para $t = 2, 3, 4, 6, 8, 10$.

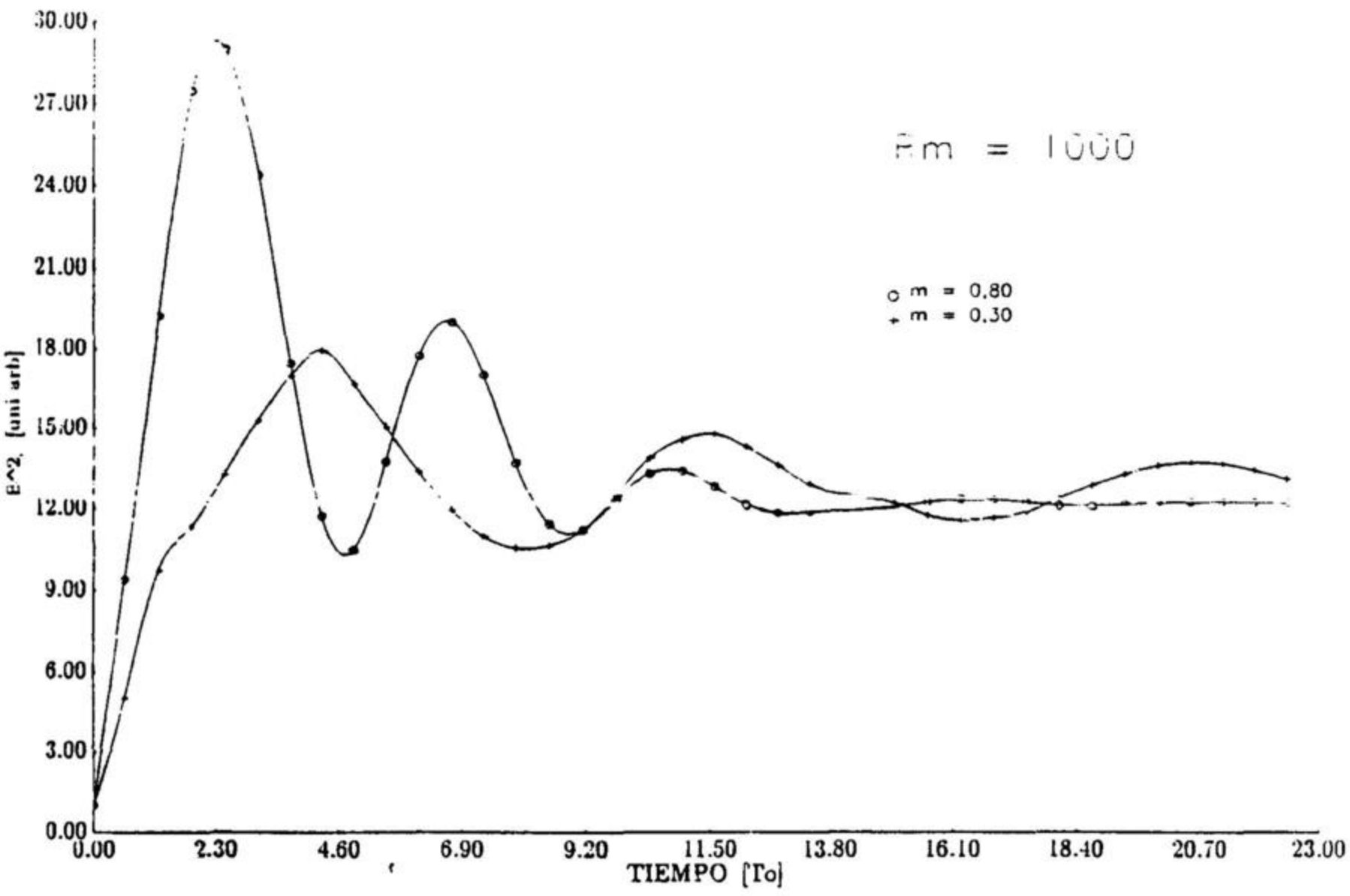


Figura 3.4.37 Variación de la densidad de energía magnética media en el tiempo para diferentes torbellinos débiles.

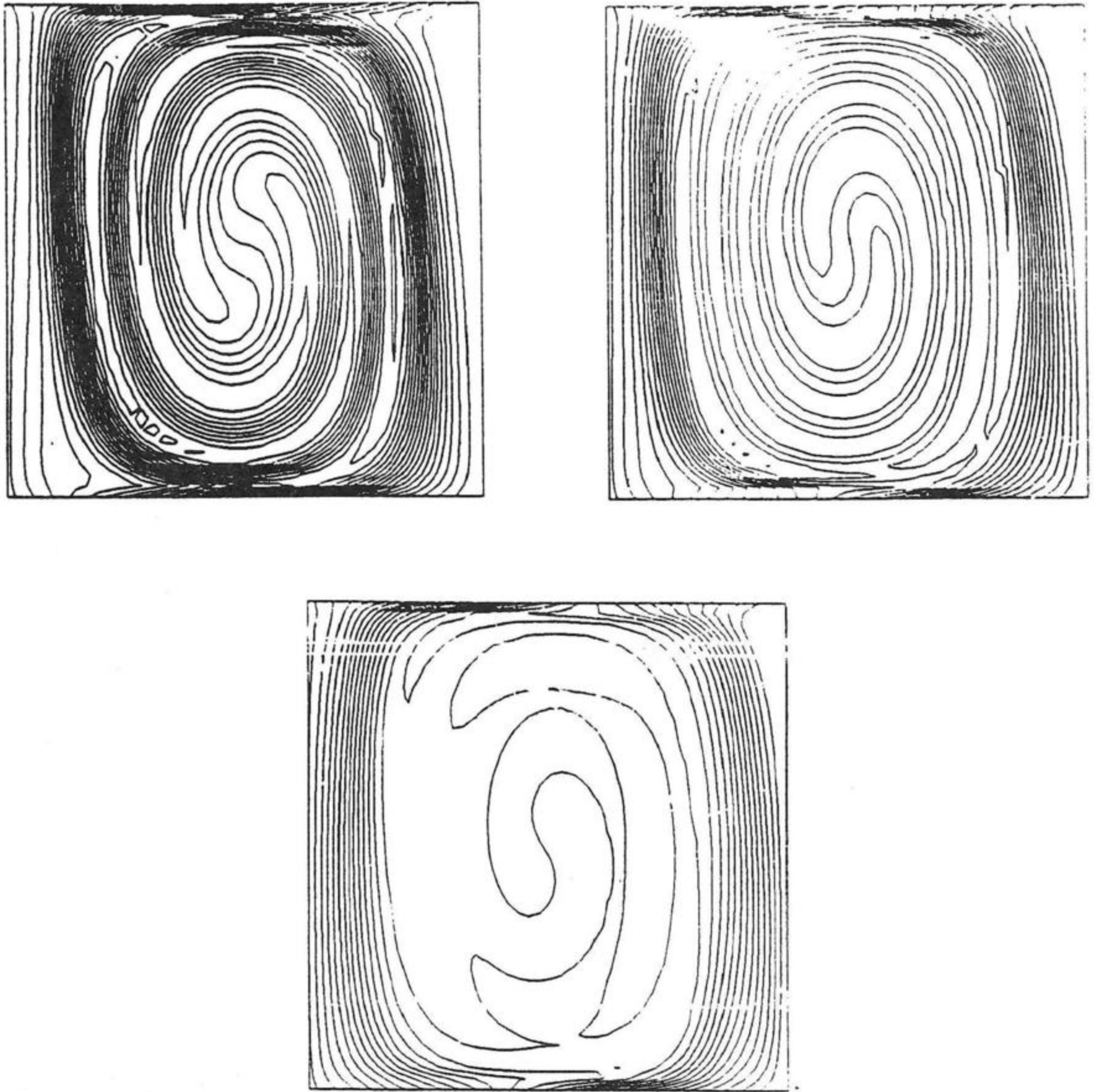


Figura 3.4.38 Secuencia de imágenes para el torbellino débil vertical para $R_m = 1000$ y $m = 1,00$. Para $t = 2, 3, 5$.

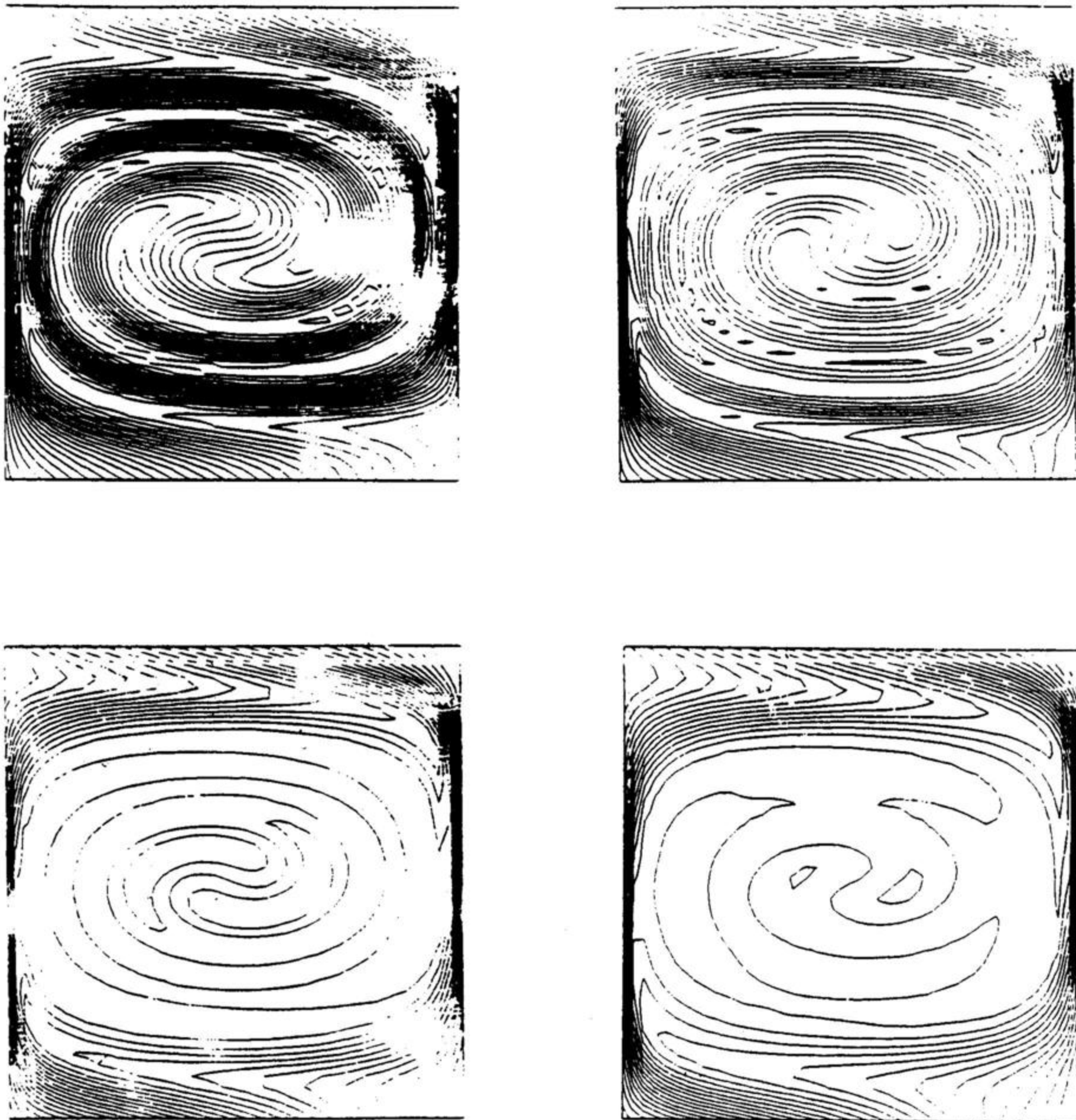


Figura 3.4.39 Secuencia de imágenes para el torbellino débil horizontal para $R_m = 1000$ y $m = 1,00$. Para $t = 2, 3, 5$.

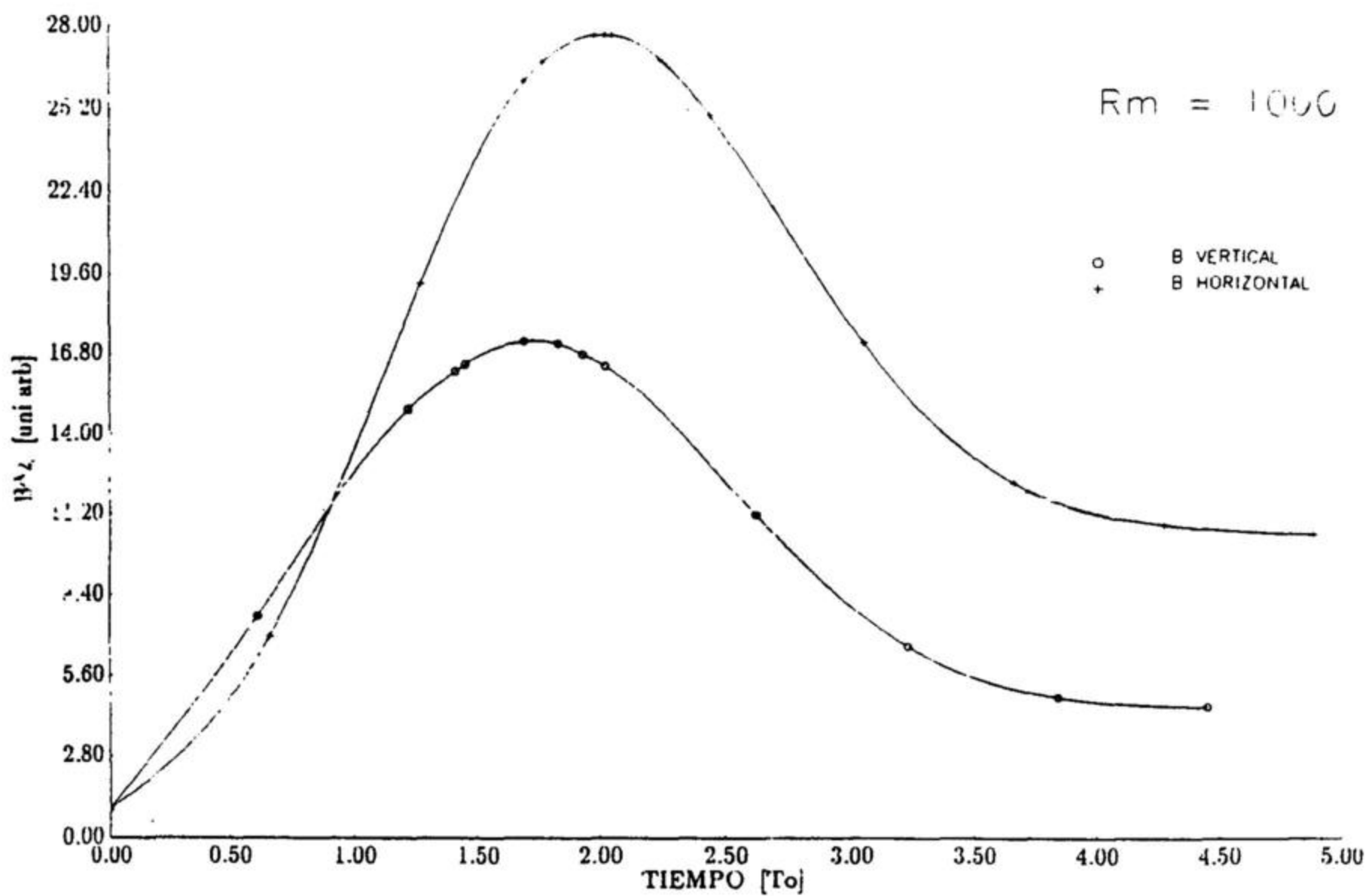


Figura 3.4.40 Variación de la densidad de energía magnética media en el tiempo para torbellinos débiles con $R_m = 1000$ y $m = 1,00$.